

**SENSIBILIDAD DE MODELOS DE ANÁLISIS NO LINEAL
CASO: ESTRUCTURA DE MUROS DE CONCRETO
REFORZADO**

SIMÓN VENSŁAUSKAS JARAMILLO

**Trabajo de grado para optar por el título de:
Ingeniero civil**

Carlos Andrés Blandón Uribe Ph.D.



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
INGENIERÍA CIVIL
ENVIGADO
2015**

CONTENIDO

1	PRELIMINARES.....	12
1.1	CONTEXTO Y CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA	12
1.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	12
1.3	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	12
1.3.1	OBJETIVO GENERAL.....	12
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.4	MARCO DE REFERENCIA	13
1.4.1	DINÁMICA ESTRUCTURAL BÁSICA.....	13
1.4.2	PRINCIPIOS DE ANÁLISIS NO LINEAL.....	14
1.4.3	PARÁMETROS Y VARIABLES BÁSICAS	16
1.4.4	AMORTIGUAMIENTO DE RAYLEIGH	18
1.4.5	AMORTIGUAMIENTO MODAL.....	19
1.4.6	MODELO DE CONFINAMIENTO DEL CONCRETO DE MANDER	20
1.4.7	CONTEXTUALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	20
2	PROCEDIMIENTO O DISEÑO METODOLÓGICO	21
3	DESARROLLO DEL PROYECTO.....	22
3.1	ETAPA 1.....	23
3.2	ETAPAS 2, 3, 4 Y 5	23
3.2.1	PARÁMETRO 1: DISCRETIZACIÓN DE LAS FIBRAS ESTRUCTURALES DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL:	29
3.2.1.1	DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 1 (ETAPA 2)	29
3.2.1.2	MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 1 (ETAPA 3)	30
3.2.1.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 1 (ETAPAS 4 Y 5)	30

3.2.2	PARÁMETRO 2: MODELACIÓN DE LAS LOSAS:.....	31
3.2.2.1	DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 2 (ETAPA 2)	31
3.2.2.2	MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 2 (ETAPA 3) 31	
3.2.2.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 2 (ETAPAS 4 Y 5)	32
3.2.3	PARÁMETRO 3: EFECTO P-DELTA:.....	35
3.2.3.1	DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 3 (ETAPA 2)	35
3.2.3.2	MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 3 (ETAPA 3) 35	
3.2.3.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 3 (ETAPAS 4 Y 5)	35
3.2.4	PARÁMETRO 4: AMORTIGUAMIENTO.....	38
3.2.4.1	DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 4 (ETAPA 2)	38
3.2.4.2	MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 4 (ETAPA 3) 38	
3.2.4.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 4 (ETAPAS 4 Y 5)	39
3.2.5	PARÁMETRO 5: MODELO DEL CONCRETO.....	42
3.2.5.1	DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 5 (ETAPA 2)	42
3.2.5.2	MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 5 (ETAPA 3) 43	
3.2.5.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 5 (ETAPAS 4 Y 5)	45
3.2.6	PARÁMETRO 6: MATERIAL DE CORTANTE	48
3.2.6.1	DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 6 (ETAPA 2)	48
3.2.6.2	MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 6 (ETAPA 3) 49	
3.2.6.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 6 (ETAPAS 4 Y 5)	49
3.2.7	PARÁMETRO 7: RIGIDEZ DE LAS LOSAS	51
3.2.7.1	DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 7 (ETAPA 2)	51

3.2.7.2	MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 7 (ETAPA 3)	52
3.2.7.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 7 (ETAPAS 4 Y 5)	52
3.2.8	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD GENERAL (ETAPAS 4 Y 5).....	54
4	DISCUSIÓN DE RESULTAODS	65
5	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES.....	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de entrada para definir un acero de refuerzo en el programa SeismoStruct. (SeismoStruct, 2012)	17
Tabla 2. Parámetros de entrada para definir un concreto en el programa SeismoStruct. (SeismoStruct, 2012)	18
Tabla 3. Descripción de modelos generados.	24
Tabla 4. Rangos cualitativos del error relativo.....	29
Tabla 5. Predicción de desplazamientos de techo EQ2	55
Tabla 6. Predicción de desplazamientos de techo EQ3	56
Tabla 7. Predicción de desplazamientos de techo EQ4	58
Tabla 8. Predicción de derivas EQ2.....	62
Tabla 9. Predicción de derivas EQ3.....	64

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Sistema masa resorte amortiguador	13
Ilustración 2. Aceleración del suelo en un sismo. Barberis-Maino (1989).....	14
Ilustración 3. Sistema de un grado de libertad bajo aceleración del suelo. Barberis-Maino (1989)	14
Ilustración 4. Curva de comportamiento momento-curvatura de Takeda-Modificada. Picón (2003)	15
Ilustración 5. Modelo de plasticidad distribuida para sección de concreto con tubo de acero interior. Hajjar, Schiller, & Molodan (1998)	16
Ilustración 6. Curvas de carga deformación mostrando la influencia del número de secciones o puntos de integración. Papachristidis et al. (n.d.)	17
Ilustración 7. Variación de amortiguamiento respecto a la frecuencia (ilustración tomada de: OrcaFlex, n.d.)	19
Ilustración 8. Estructura ensayada en la USDC año 2006. Tomada de Kelly (2006)	21
Ilustración 9. Refuerzo y geometría del muro. A la izquierda pisos 1 y 7 a la derecha pisos del 2 al 6 (todas las medidas en mm)	21
Ilustración 10. Modelos en PERFORM 3D con y sin modelación de losa y columnas.....	24
Ilustración 11. Aceleración Sismo EQ1	27
Ilustración 12. Aceleración Sismo EQ2	27
Ilustración 13. Aceleración Sismo EQ3	28
Ilustración 14. Aceleración Sismo EQ4	28
Ilustración 15. Sección transversal muro pisos 2 al 6 modelo UCSD_1	30
Ilustración 16. Sección transversal muro pisos 2 al 6 modelo UCSD_1_T1	30
Ilustración 17. Error relativo desplazamiento y derivas modelos Parámetro 1	31
Ilustración 18. Error relativo desplazamientos parámetro 2 EQ2.....	32

Ilustración 19. Error relativo desplazamientos parámetro 2 EQ3.....	33
Ilustración 20. Error relativo deriva parámetro 2 EQ2.....	33
Ilustración 21. Error relativo deriva parámetro 2 EQ3.....	34
Ilustración 22. Error relativo aceleración parámetro 2 EQ2	34
Ilustración 23. Error relativo aceleración parámetro 2 EQ3	35
Ilustración 24. Error relativo desplazamientos parámetro 3 EQ2.....	36
Ilustración 25. Error relativo desplazamientos parámetro 3 EQ3.....	36
Ilustración 26. Error relativo desplazamientos parámetro 3 EQ4.....	37
Ilustración 27. Error relativo derivas parámetro 3 EQ1	37
Ilustración 28. Error relativo derivas parámetro 3 EQ3.....	38
Ilustración 29. Error relativo derivas parámetro 3 EQ4.....	38
Ilustración 30. Error relativo desplazamientos parámetro 4 EQ2.....	39
Ilustración 31. Error relativo desplazamientos parámetro 4 EQ3.....	40
Ilustración 32. Error relativo desplazamientos parámetro 4 EQ4.....	40
Ilustración 33. Error relativo derivas parámetro 4 EQ2.....	41
Ilustración 34. Error relativo derivas parámetro 4 EQ3.....	41
Ilustración 35. Error relativo derivas parámetro 4 EQ4.....	42
Ilustración 36. Forma de la relación bilineal del material de concreto (sistema ingles de unidades de esfuerzo)	42
Ilustración 37. Forma de la relación trilineal del material de concreto (sistema internacional de unidades de esfuerzo)	43
Ilustración 38. Relación bilineal definida para el concreto	43
Ilustración 39. Relación trilineal definida para el concreto no confinado.....	44
Ilustración 40. Relación trilineal definida para el concreto medianamente confinado	44
Ilustración 41. Relación trilineal definida para el concreto confinado.....	45
Ilustración 42. Error relativo desplazamientos parámetro 5 EQ2.....	46

Ilustración 43. Error relativo desplazamientos parámetro 5 EQ3.....	46
Ilustración 44. Error relativo desplazamientos parámetro 5 EQ4.....	46
Ilustración 45. Error relativo derivas parámetro 5 EQ2.....	47
Ilustración 46. Error relativo derivas parámetro 5 EQ3.....	47
Ilustración 47. Error relativo derivas parámetro 5 EQ4.....	48
Ilustración 48. Relación esfuerzo deformación elástica material de cortante del muro	48
Ilustración 49. Relación esfuerzo deformación inelástica material de cortante del muro .	49
Ilustración 50. Error relativo desplazamientos parámetro 6 EQ2.....	50
Ilustración 51. Error relativo desplazamientos parámetro 6 EQ3.....	50
Ilustración 52. Error relativo derivas parámetro 5 EQ2.....	51
Ilustración 53. Error relativo derivas parámetro 6 EQ3.....	51
Ilustración 54. Error relativo desplazamientos parámetro 7 EQ2.....	52
Ilustración 55. Error relativo desplazamientos parámetro 7 EQ3.....	52
Ilustración 56. Error relativo desplazamientos parámetro 7 EQ4.....	53
Ilustración 57. Error relativo derivas parámetro 7 EQ2.....	53
Ilustración 58. Error relativo derivas parámetro 7 EQ3.....	54
Ilustración 59. Error relativo derivas parámetro 7 EQ4.....	54
Ilustración 60. Error relativo desplazamientos todos los modelos EQ2	56
Ilustración 61. Error relativo desplazamientos todos los modelos EQ3	58
Ilustración 62. Error relativo desplazamientos todos los modelos EQ4	60
Ilustración 63. Error relativo aceleraciones EQ2	61
Ilustración 64. Error relativo aceleraciones EQ3	62
Ilustración 65. Error relativo derivas todos los modelos EQ2	63
Ilustración 66. Error relativo derivas todos los modelos EQ3	65

RESUMEN

Para ciertos casos de análisis estructural, ya sea por la complejidad, el tipo de uso de la estructura o el juicio del ingeniero, es posible realizar un análisis haciendo uso de métodos avanzados que incluyen tanto las características no lineales de la estructura como la demanda sísmica por medio de acelerogramas. Este tipo de análisis sin embargo, resulta más complejo que los análisis elásticos, y se ha encontrado que existe gran incertidumbre a la hora de caracterizar los modelos a partir de los parámetros de entrada. En el presente trabajo se analiza el caso de una estructura de muros de concreto reforzado de 7 pisos sometida a movimientos sísmicos de diferente magnitud en mesa vibradora donde se comparan cuantitativamente por medio del error relativo, los resultados de desplazamientos, derivas y aceleraciones, obtenidas en modelos analíticos respecto a las respuestas experimentales. En estos modelos se modifican los valores de algunos parámetros de entrada y se identifica la sensibilidad de la respuesta ante dichas variaciones. Se obtienen los resultados de sensibilidad para cada uno de los parámetros analizados y se concluye sobre la importancia y la atención que se debe tener al definir cada uno de estos con el fin de obtener buenas predicciones.

Palabras clave: Modelo, No-Lineal, Desplazamientos, Derivas, Aceleraciones.

ABSTRACT

In some cases of structural analysis, either by the complexity, the type of use of the structure or the judgment of the designer, is possible to do an analysis using advanced methods that include both nonlinear characteristics of the structures and seismic demand through accelerograms. This type of analysis however, is more complex than elastic analysis, and has been found that there is great uncertainty characterizing the models from the input parameters. In this paper, the case of a 7-story building subjected to earthquakes of different magnitudes is analyzed by comparing quantitatively the results of displacements, drifts and accelerations obtained in analytical models regarding the experimental response. In these models the values of some input parameters are varied and the sensibility of the response is analyzed. For each parameter, the sensibility results are obtained and the importance on the model is determined.

Key words: Model, Non-Linear, Displacements, Drifts, Accelerations

INTRODUCCIÓN

En el presente informe se busca desarrollar una investigación que arroje resultados cuantitativos con el fin de identificar la sensibilidad de los modelos de análisis no lineal ante la variación de los parámetros de entrada para una estructura de muros de concreto reforzado de 7 pisos. Al identificar la sensibilidad de estos modelos, es posible concluir sobre la importancia de los parámetros y la manera en que su variación afecta la predicción de las variables de salida. Con el fin de desarrollarlo de forma clara y organizada, se divide en las secciones que se describen brevemente a continuación.

1. Preliminares

1.1 Contexto y caracterización del problema: En esta sección el lector encuentra el contexto y la delimitación del problema que se aborda a lo largo de la investigación.

1.2 Formulación del problema: En esta sección se define claramente cuál es el problema sobre el que se va a desarrollar la investigación.

1.3 Objetivos del proyecto: En esta sección se definen tanto los objetivos específicos como el objetivo general del proyecto, de esta manera se precisa qué se espera alcanzar con la investigación, es decir, cuál es la meta que se desea cumplir con el trabajo de grado.

1.4 Marco de referencia: En esta sección se presentan los fundamentos y conceptos teóricos necesarios para entender el problema y desarrollar los objetivos a lo largo de la investigación.

2. Procedimiento o diseño metodológico: En esta sección se describen las etapas definidas para el desarrollo del proyecto, las cuales se llevan a cabo en el orden que se plantean con el fin de cumplir uno a uno los objetivos específicos y finalmente el objetivo final.

3. Desarrollo del proyecto: En esta sección se presentan todos los resultados obtenidos tras la investigación, se describen los modelos, se presentan los resultados para cada parámetro y se analizan los resultados analíticos respecto a los experimentales para determinar la sensibilidad de los modelos. Esta sección se divide según el desarrollo de las etapas descritas en la sección anterior.

4. Discusión de resultados: A partir de los resultados presentados en la sección anterior se realiza todo el análisis y la discusión en correspondencia con los objetivos específicos.

5. Conclusiones y consideraciones: En esta sección se realizan reflexiones fruto del trabajo realizado, y algunos comentarios para tener en cuenta en futuras investigaciones que aborden el mismo problema.

1 PRELIMINARES

1.1 CONTEXTO Y CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo con el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) se reconocen varios métodos de análisis del sistema de resistencia sísmica de una edificación para efectos de su diseño, entre éstos pueden mencionarse: el método de la fuerza horizontal equivalente, el método de análisis dinámico elástico, el método de análisis dinámico inelástico, y otros métodos de análisis alternos con aceptación general en la ingeniería. Entre éstos, algunos consideran un análisis avanzado teniendo en cuenta el rango inelástico de la edificación, con lo cual es posible obtener un modelo que represente con más fidelidad el fenómeno físico.

Algunas estructuras, de acuerdo con sus características de uso, y según el juicio del ingeniero, deben ser analizadas con dichos métodos avanzados que permiten identificar el comportamiento de la estructura en el rango inelástico. Sin embargo, estos métodos pueden arrojar resultados muy dispersos dependiendo de los parámetros de entrada que se tengan en cuenta para alimentar el modelo.

La comparación de las estimaciones numéricas de la distribución de esfuerzos y deformaciones de los elementos estructurales experimentales en muros de concreto reforzado, realizada por investigadores a partir de resultados experimentales en la mesa vibradora del *USCD Engelkirk Structural Research Centre* demuestran que puede haber una gran diferencia entre los resultados obtenidos a partir del modelo numérico y los medidos de forma experimental (Blandón, 2011). Lo anterior, ratifica la incertidumbre existente respecto al uso de algunos parámetros de entrada en el modelo y el desconocimiento por parte de los ingenieros calculistas del efecto de la definición de ciertos parámetros de entrada en la respuesta de los modelos.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Entre las alternativas para el análisis de estructuras existen métodos avanzados que permiten incluir simultáneamente variables como el comportamiento no lineal de los elementos y la demanda sísmica por medio de acelerogramas. El resultado de estos métodos depende de un gran número de parámetros de entrada. Es necesario identificar la sensibilidad de los resultados ante variaciones en dichos parámetros en los métodos definidos para el caso de edificaciones con sistemas de muros de concreto reforzado.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la sensibilidad de los modelos de análisis estructural no lineal utilizados en sistemas de muros de concreto reforzado, ante la variación en los valores de diferentes parámetros de entrada del modelo.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar los parámetros de entrada para los modelos de análisis no lineal de sistemas de muros de concreto reforzado.

Plantear quince (15) a veinte (20) modelos modificando los parámetros de entrada identificados, y comparar los resultados de los mismos con los resultados experimentales obtenidos en el ensayo de mesa vibradora del USCD.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Evaluar la sensibilidad de los modelos al cambiar el valor de los parámetros de entrada.

Identificar los parámetros más importantes para cada modelo teniendo en cuenta el grado de sensibilidad de éstos.

1.4 MARCO DE REFERENCIA

1.4.1 DINÁMICA ESTRUCTURAL BÁSICA

El análisis dinámico de estructuras puede entenderse en su forma más simplificada bajo las ecuaciones dinámicas clásicas de masa, resorte amortiguador. Para una estructura con un solo grado de libertad se puede plantear la siguiente ecuación dinámica de equilibrio basada en la segunda ley de Newton a partir del diagrama básico mostrado en la Ilustración 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

$$F(t) = m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t)$$

ecuación 1

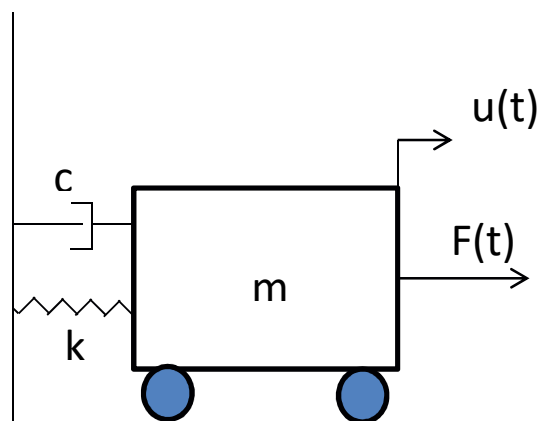


Ilustración 1. Sistema masa resorte amortiguador

Donde:

m: masa del sistema

c: coeficiente de amortiguamiento

k: rigidez del resorte

$\ddot{u}(t)$: aceleración de la masa

$\dot{u}(t)$: velocidad de la masa

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$u(t)$: desplazamiento de la masa

De acuerdo con García (1998) en el caso de análisis estructural sísmico, a diferencia del caso planteado en la Ilustración 1, la fuerza está dada por la aceleración de la masa debido a una aceleración aleatoria del suelo (Ilustración 2), lo cual modifica la ecuación básica presentada anteriormente (ecuación 1). En la Ilustración 3 se observa un sistema estructural de un grado de libertad sometido a una aceleración del suelo. A partir del equilibrio dinámico se llega a la ecuación 2, que representa el comportamiento del sistema.

$$m\ddot{u}_r(t) + c\dot{u}_r(t) + k u_r(t) = -m\ddot{u}_g(t)$$

ecuación 2

Donde:

$\ddot{u}_r(t)$: aceleración relativa de la masa respecto a la base

$\dot{u}_r(t)$: velocidad relativa de la masa respecto a la base

$\ddot{u}_g(t)$: aceleración del suelo

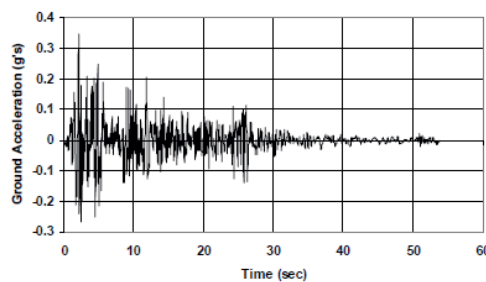


Ilustración 2. Aceleración del suelo en un sismo. Barberis-Maino (1989)

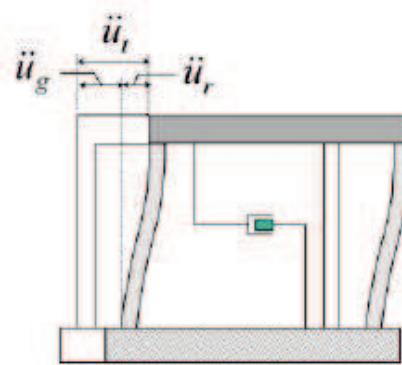


Ilustración 3. Sistema de un grado de libertad bajo aceleración del suelo. Barberis-Maino (1989)

1.4.2 PRINCIPIOS DE ANÁLISIS NO LINEAL

Suponiendo que en el problema representado por la ecuación 2 se trabaja en el rango elástico de los materiales, es posible suponer que las propiedades de éstos permanecen constantes en el

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

tiempo, siendo así, sería posible resolver el problema haciendo uso de integrales de Duhamel, o métodos de integración numérica como el de Newmark, entre otros (Bathe, 1996). Sin embargo, la NSR-10 permite realizar el diseño estructural dentro del rango no lineal, es decir que se le permite a la estructura disipar energía en forma de daño, lo cual conlleva variaciones en la rigidez en términos de las deformaciones. De esta manera, la solución de la ecuación 2 solo es posible aplicando métodos numéricos iterativos.

Existen varios métodos para modelar la respuesta no-lineal de los elementos estructurales en los programas de análisis. Uno de los métodos más comunes es el de plasticidad concentrada, en el cual “las deformaciones plásticas se agrupan en los extremos de un elemento elástico-lineal y se basan en las relaciones momento-curvatura de las secciones de extremo para una carga axial dada” (Fragiadakis & Papadrakakis, 2008, p. 03). Al integrar la relación momento-curvatura en una longitud definida da como resultado rotaciones. Seguidamente, al integrar las rotaciones se obtienen los desplazamientos.

Uno de los modelos más utilizados para describir la relación momento curvatura es el de Takeda-Modificado, como el mostrado en la Ilustración 4, el cual “es capaz de representar el comportamiento inelástico, la disminución de la rigidez de un elemento de concreto armado debido al agrietamiento del concreto y la pérdida de adherencia en la interface acero-concreto” (Picón, 2003, p. 22).

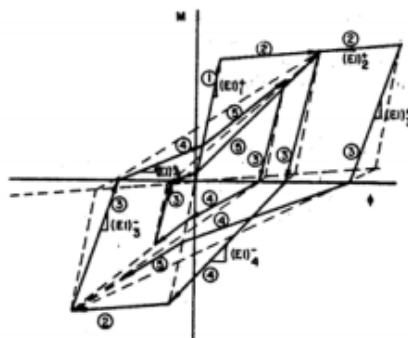


Ilustración 4. Curva de comportamiento momento-curvatura de Takeda-Modificada. Picón (2003)

Otro de los métodos más comunes es el de plasticidad distribuida, en el cual se ingresa el modelo de los materiales de la sección, la cual se divide en fibras representadas por las propiedades del concreto y del acero, como se ve en la Ilustración 5, en la cual se muestra la modelización de una viga de concreto con tubo de acero en la parte interior. Dichas fibras son áreas formadas en la sección, en las cuales se evalúan los parámetros de deformación y esfuerzo (Fragiadakis & Papadrakakis, 2008). Para cada uno de los materiales se caracterizan sus propiedades según diferentes parámetros de entrada (ver Tabla 1 y Tabla 2).

Según Fragiadakis y Papadrakakis (2008), el método de plasticidad distribuida, requiere una capacidad computacional más alta que el método de plasticidad concentrada, además se requiere ingresar las leyes constitutivas de los materiales, lo cual lo hace más difícil de calibrar con resultados experimentales. Sin embargo, el método de plasticidad distribuida puede ser fácilmente aplicado en secciones que consisten en diferentes materiales como la que se muestra en la Ilustración 5.

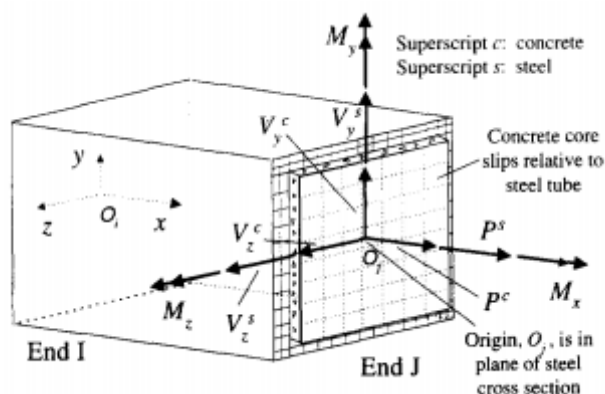


Ilustración 5. Modelo de plasticidad distribuida para sección de concreto con tubo de acero interior. Hajjar, Schiller, & Molodan (1998)

1.4.3 PARÁMETROS Y VARIABLES BÁSICAS

Para aplicar los métodos de plasticidad distribuida y concentrada mencionados anteriormente, deben definirse varios parámetros que caracterizarán el modelo de cada elemento. En la Tabla 1 se muestran algunos de los parámetros que deben ser ingresados al modelo para definir, en dicho caso, un acero de refuerzo en el software SeismoStruct, mientras en la Tabla 2 se muestran los parámetros de entrada para definir las propiedades de un concreto en el mismo software. El criterio para definir dichos parámetros debe ser preciso con el fin de obtener resultados acordes a la respuesta real. Tras realizar la definición de las variables de entrada se especifican las uniones entre elementos y se realiza el análisis estructural completo bajo cargas sísmicas resolviendo la ecuación de equilibrio paso a paso. En cada uno de los pasos se comprueba el equilibrio estructural en diferentes puntos denominados puntos Gaussianos (puntos de integración) donde se definieron previamente las características de la sección. Partiendo de estos puntos, se extrapolan los resultados obtenidos al resto del elemento tras realizar una serie de hipótesis de las distribuciones de fuerzas y desplazamientos.

La cantidad de puntos de integración es otro de los parámetros a tener en cuenta al plantear el modelo, en la Ilustración 6 se muestra la relación carga-deformación de un modelo según el número de puntos de integración escogidos realizada por Papachristidis, Fragiadakis, y Papadrakakis, (2005), la cual demuestra la sensibilidad de la respuesta del modelo al número de puntos seleccionados.

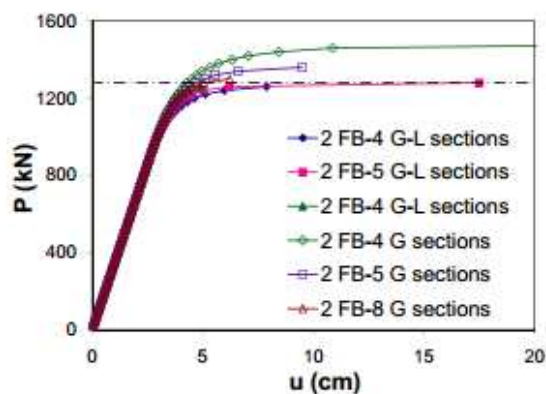


Ilustración 6. Curvas de carga deformación mostrando la influencia del número de secciones o puntos de integración. Papachristidis et al. (n.d.)

Tabla 1. Parámetros de entrada para definir un acero de refuerzo en el programa SeismoStruct. (SeismoStruct, 2012)

Material Properties	Typical values	Default values
Modulus of elasticity - E_s	2.00E+08 - 2.10E+08 (kPa)	2.00E+08 (kPa)
Yield strength - f_y	230000 - 650000 (kPa)	500000 (kPa)
Strain hardening parameter - μ	0.005 - 0.015 (-)	0.005 (-)
Transition curve initial shape parameter - R_0	20 (-)	20 (-)
Transition curve shape calibrating coefficient - $A1$	18.5 (-)	18.5 (-)
Transition curve shape calibrating coefficient - $A2$	0.05 - 0.15 (-)	0.15 (-)
Kinematic/isotropic weighing coefficient - P	Close to 0.9 (-)	0.9 (-)
Spurious unloading corrective parameter - r	2.5 - 5 (%)	2.5 (%)
Transverse reinforcement spacing - L	-	0.1 (m)
Longitudinal re-bar diameter - D	2 - 7 (-)	0.02 (m)
Fracture strain		0.1(-)
Specific weight - γ	78 (kN/m ³)	78 (kN/m ³)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 2. Parámetros de entrada para definir un concreto en el programa SeismoStruct. (SeismoStruct, 2012)

Material Properties	Typical values	Default values
Compressive strength - f_c	15000 - 45000 (kPa)	30000 (kPa)
Tensile strength - f_t	-	0 (kPa)
Strain at peak stress - ϵ_c	0.002 - 0.0022 (m/m)	0.002 (m/m)
Poisson's ratio - ν	0.15 - 0.20 (-) (norm. conc.)	0.2 (-)
Yield strength of transverse steel - f_{yh}	230000 - 500000 (kPa)	275000 (kPa)
Modulus of elasticity of transverse steel - E_{sh}	2.00E+08 - 2.10E+08 (kPa)	2.00E+08 (kPa)
Strain hardening parameter of transverse steel - μ_{sh}	0.005 - 0.015 (-)	0.005 (-)
Diameter of transverse steel - d_s	-	0.008 (m)
Spacing of transverse steel - s	-	0.1 (m)
Diameter of concrete core - Φ_c	-	0.3 (m)
Specific weight - γ	24 (kN/m ³)	24 (kN/m ³)

Algunas variables adicionales a determinar para definir el modelo, son el amortiguamiento y el deslizamiento del acero en las uniones de vigas con columnas o columnas con fundación. Para el amortiguamiento, el procedimiento más utilizado es el de amortiguamiento proporcional a la masa y la rigidez o el tipo Rayleigh, sin embargo Rubinstein & Ascheri (2011) señalan que se ha encontrado que para el rango inelástico de los elementos, éste método puede sobre estimar la disipación de energía y proponen el método proporcional a la masa y la rigidez tangente en cada instante. Shunsuke Otani (1981) encuentra que la variable de amortiguamiento puede generar grandes incertidumbres en los resultados numéricos, por lo que es necesario definirla con criterios adecuados con el fin de obtener buenos resultados en la modelización.

Para el efecto de deslizamiento del acero, se hace necesario introducir variables adicionales al modelo para representar dicho fenómeno, pues debido a éste, se generan deformaciones adicionales en el sistema. Zhao y Sritharan (2006), tras comparar modelos que incluían el deslizamiento del acero con aquellos que no lo incluían y relacionándolos con resultados experimentales, encontraron que si no se tiene en cuenta dicho fenómeno, las fuerzas laterales y curvaturas obtenidas son mucho mayores a las experimentales.

1.4.4 AMORTIGUAMIENTO DE RAYLEIGH

De acuerdo al manual del programa Perform 3D (Computers and Structures, 2006), el amortiguamiento de Rayleigh asume que la estructura tiene una matriz de amortiguamiento C dada por la siguiente expresión

$$C = \mu M + \lambda K$$

Donde M es la matriz de masa, K es la matriz de rigidez inicial mi (μ) y $lambda$ (λ) son factores de multiplicación.

En la Ilustración 7 se observa como los términos de amortiguamiento de masa y rigidez aportan al amortiguamiento general.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

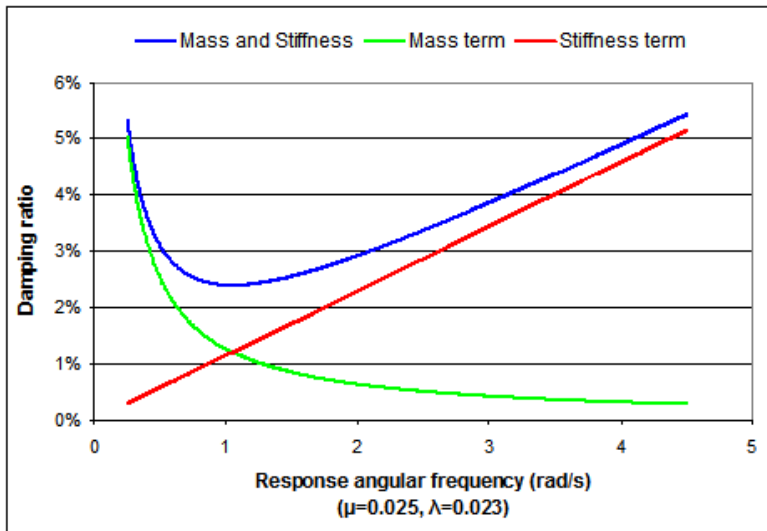


Ilustración 7. Variación de amortiguamiento respecto a la frecuencia (ilustración tomada de: OrcaFlex, n.d.)

1.4.5 AMORTIGUAMIENTO MODAL

De acuerdo al Manual de Perform 3D Computers and Structures (2006):

El modelo de amortiguamiento modal se fundamenta en una matriz basada en los modos a los cuales se les ha calculado la forma modal.

PERFORM 3D usa las formas modales y periodos (elásticos), y calcula la matriz de amortiguamiento implícita usando principios de dinámica estructural. Esta matriz está dada por:

$$\underline{C} = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{4\pi}{T_n} \xi_n \frac{(\underline{M}\underline{\phi}_n)(\underline{M}\underline{\phi}_n)^T}{\underline{\phi}_n^T \underline{M} \underline{\phi}_n}$$

Donde N es el número de modos amortiguados, T_n es el periodo del modo, ξ_n es el coeficiente de amortiguamiento del modo, M es la matriz de masa y ϕ_n es la forma modal.

La interpretación física del amortiguamiento modal en una estructura lineal se basa en que a medida que una estructura se deforma por efecto de una fuerza sísmica dinámica, su forma deformada cambia constantemente. En cualquier instante de tiempo esta forma puede descomponerse en formas modales, cada forma modal vibrando independientemente en su frecuencia natural. Así, cada modo está amortiguado independientemente. En principio esto podría extenderse a estructuras no lineales. Si el comportamiento de la estructura es lineal entre eventos no lineales bien definidos, como la deformación de la rótula plástica, las formas modales pueden ser recalculadas en cada evento (por ejemplo, cada vez que la rigidez cambia), y de esta manera el amortiguamiento modal podría ser asumido. Es muy costoso computacionalmente sin embargo, recalculas las formas modales (y por lo tanto la matriz de amortiguamiento) en cada evento. Por esto, cuando se asume amortiguamiento modal en estructuras no lineales, la matriz de amortiguamiento permanece constante. En cualquier instante de

tiempo la forma deformada de la estructura contiene contribución de las formas modales elásticas. Sin embargo, a diferencia del caso lineal, los periodos efectivos de vibración de estas formas no son los periodos lineales, las formas son generalmente dependientes, y la deformada contiene formas diferentes a las modales. Los efectos de esto son los siguientes:

- a) Las formas modales están amortiguadas, pero dado que el periodo efectivo pudo haber cambiado (probablemente aumentado) mientras que el coeficiente de amortiguamiento efectivo permanece constante, la cantidad de amortiguamiento expresada como una proporción de amortiguamiento crítico, generalmente cambia.
- b) Los únicos componentes de la deformada que están amortiguados, son esos que corresponden a las formas modales lineales, todas las demás deformadas no están amortiguadas. (p.18-1)

Cuando se trabaja con amortiguamiento modal, generalmente se recomienda agregar una proporción de amortiguamiento de Rayleigh para amortiguar las formas modales diferentes a las elásticas.

1.4.6 MODELO DE CONFINAMIENTO DEL CONCRETO DE MANDER

Mander, Priestley, & Park (1988) plantearon un modelo de concreto confinado por estribos de refuerzo transversales aplicable para secciones tanto rectangulares como circulares sometido a compresión uniaxial. El modelo planteado permite cargas cíclicas e incluye la velocidad de deformación

Los resultados obtenidos por Mander et al. (1988) revelan las diferencias de comportamiento entre concreto confinado y no confinado, mostrando el primero un aumento en la resistencia y la ductilidad.

Partiendo de dicho planteamiento es posible caracterizar el hormigón dentro del modelo estructural y definir dentro de sus características el confinamiento dado por estribos laterales.

1.4.7 CONTEXTUALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

El desarrollo de la investigación se apoya en los resultados de los experimentos realizados en el año 2006 en la Universidad de California, donde se sometió a una estructura de 7 pisos en muros de concreto reforzado a escala real mostrada en la Ilustración 8 a 4 movimientos sísmicos en la base.

La estructura fue instrumentada en su totalidad con más de 600 sensores, con los cuales se midió su respuesta ante los sismos inducidos. Todos los resultados teóricos de este trabajo de grado se comparan con los resultados experimentales medidos en la estructura real.



Ilustración 8. Estructura ensayada en la USDC año 2006. Tomada de Kelly (2006)

Los planos de refuerzo y geometría del muro se muestran en la Ilustración 9.

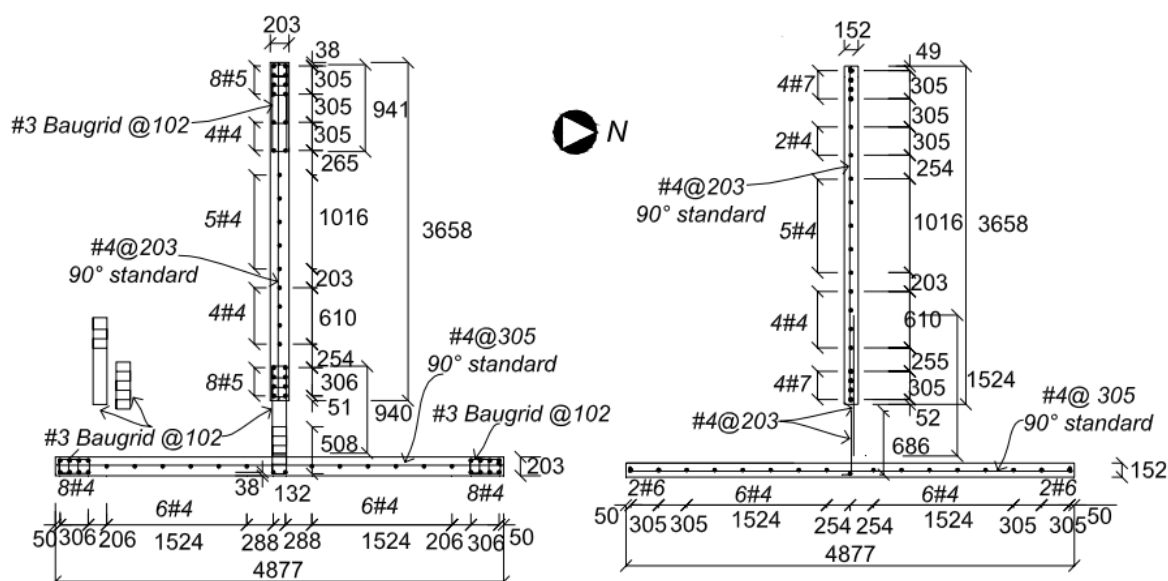


Ilustración 9. Refuerzo y geometría del muro. A la izquierda pisos 1 y 7 a la derecha pisos del 2 al 6 (todas las medidas en mm)

2 PROCEDIMIENTO O DISEÑO METODOLÓGICO

El desarrollo del presente trabajo de grado se enfocará en el cumplimiento secuencial de los objetivos específicos planteados, con el fin de conseguir los resultados esperados en de manera oportuna, dentro de los tiempos planteados en el cronograma. Para esto, se dividirá el trabajo en

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

varia etapas, las cuales se plantean en la misma secuencia de los objetivos específicos. La etapa 1 es un paso previo necesario para cumplir con los objetivos específicos en las demás etapas. De esta manera, las etapas 2, 3, 4 y 5 dan cumplimiento a los objetivos específicos 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

Etapa 1: Selección del software para modelación de la estructura. En esta etapa se selecciona el programa computacional con el cual se generan los modelos de la estructura de muros de concreto reforzado que se analizará. La selección se hará a teniendo en cuenta dos criterios. El primero es el criterio de idoneidad, para cumplir con éste, se hará una revisión bibliográfica, con el fin de identificar el software con mejores características en cuanto al análisis no lineal de estructuras, teniendo en cuenta que se trata de un sistema de muros de concreto reforzado. El segundo criterio es el de disponibilidad, en el cual se analizará la viabilidad de acceder a dicho software con los recursos que se disponen para desarrollar el presente trabajo de grado. Finalmente, se seleccionará el software que cumpla con ambos criterios.

Etapa 2: Identificación de los parámetros de entrada del modelo. En esta etapa, se hace una extensiva revisión de la bibliografía correspondiente al software seleccionado en la Etapa 1, con el fin de identificar cada una de las variables que deben ser ingresadas al modelo para definir por completo los materiales y las características estructurales. Se elaborará una lista de los parámetros identificados y su función en el modelo, con el fin de tener claridad frente a cada uno de ellos. En esta etapa se hará también una selección de algunos parámetros importantes en la modelización de la estructura. Esta selección se hará de acuerdo con la información bibliográfica consultada y la asesoría del director Carlos Blandón Uribe.

Etapa 3. Planteamiento de modelos variando parámetros de entrada. En esta etapa se analizarán de quince a veinte modelos de la estructura de muros de concreto reforzado probada en la mesa vibradora de la UCSD en el 2006. Dichos modelos variarán en cuanto al valor de los parámetros de entrada seleccionados en la Etapa 2. Para establecer los valores de entrada de cada modelo, se hará una revisión de la bibliografía con el fin de determinar los diferentes métodos o criterios para obtener los valores de entrada de dichos parámetros. Con esto, se obtendrán modelos que responderán de forma comparable cuantitativamente con la respuesta experimental.

Etapa 4. Evaluación de sensibilidad de los modelos. A partir de la respuesta de los modelos generados en la Etapa 3, se evaluarán cuantitativamente los resultados de cada uno de ellos ante la respuesta experimental, contrastando los resultados a partir de gráficas y análisis porcentual de variables. Se compararán deformaciones, derivas y aceleraciones. Dicha comparación presentará el porcentaje de error obtenido para cada modelo (en cada una de las variables de salida).

Etapa 5. Identificación de los parámetros más importantes de acuerdo con la sensibilidad de los modelos. A partir de los resultados obtenidos en la Etapa 4, se realiza un análisis cuantitativo de los cambios presentados en la respuesta de los modelos ante las variaciones en los parámetros de entrada (Etapa 3). Con esto, se realiza un análisis de sensibilidad, para determinar qué tanto cambia la respuesta de un modelo, y cuánto se ajusta a la respuesta real, al variar parámetros de entrada.

3 DESARROLLO DEL PROYECTO

Los resultados mostrados se dividen en numerales correspondientes a las etapas del proyecto consideradas y descritas en el literal 2 Procedimiento o diseño metodológico.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Para cada etapa se describe el trabajo realizado y los resultados obtenidos, con el fin de cumplir, a medida que se avance en la lectura, con cada uno de los objetivos específicos planteados inicialmente, para finalmente, tras abordar la discusión y el análisis de los resultados haber abarcado y cumplido con el objetivo general del trabajo de grado.

3.1 ETAPA 1

Se selecciona el Software PERFORM 3D de la casa CSI teniendo en cuenta que posee una poderosa capacidad para realizar análisis histórico no lineal, incluyendo la posibilidad de modelar gran variedad de elementos, entre los que se encuentran los muros estructurales, objeto de este trabajo de grado.

Con el objetivo de darle mayor significado práctico a los resultados de la investigación se busca que el software seleccionado tenga la característica de ser accesible y comercial para ser usado en las oficinas de diseño estructural, donde puede tener el mayor impacto práctico. Con PERFORM 3D se cumple con esta característica al ser un software de carácter comercial que además hace parte de la casa CSI que cuenta actualmente con un alto reconocimiento en el medio.

El último criterio para la selección del software es el de la disponibilidad. Se contaba con una licencia, propiedad de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, en la que fue posible trabajar durante el periodo de la investigación.

3.2 ETAPAS 2, 3, 4 Y 5

Se identifica una diversidad de parámetros que permiten ser variados en el modelo. Más adelante se listan aquellos que fueron analizados en esta investigación y se realiza una breve descripción de la forma en que se definen dentro del software, se presentan los modelos generados y los resultados, analizando la sensibilidad del parámetro respecto a los valores experimentales.

Para generar los cambios de los parámetros se toman como base los modelos proporcionados por Marko Schotanus y Joe Maffei utilizados en el concurso de predicción de la respuesta en el año 2006. Schotanus & Maffei (2008) describen los modelos:

Se crearon dos modelos, uno con la modelación de la losa y las columnas de gravedad y otro sin ellas. La columna prefabricada y el muro de ala no son tenidos en cuenta en el modelo exceptuando su influencia en la masa. La masa en cada piso se basa en el peso propio, (...). Las masas del muro y las losas se distribuyen sobre los nodos del muro, en una relación 1:2:1 simplificada. Todas las masas adicionales se agrupan en el nodo central del muro. (p.11)

En la Ilustración 10 se observan los modelos descritos y en la Tabla 3 se describen los modelos generados.

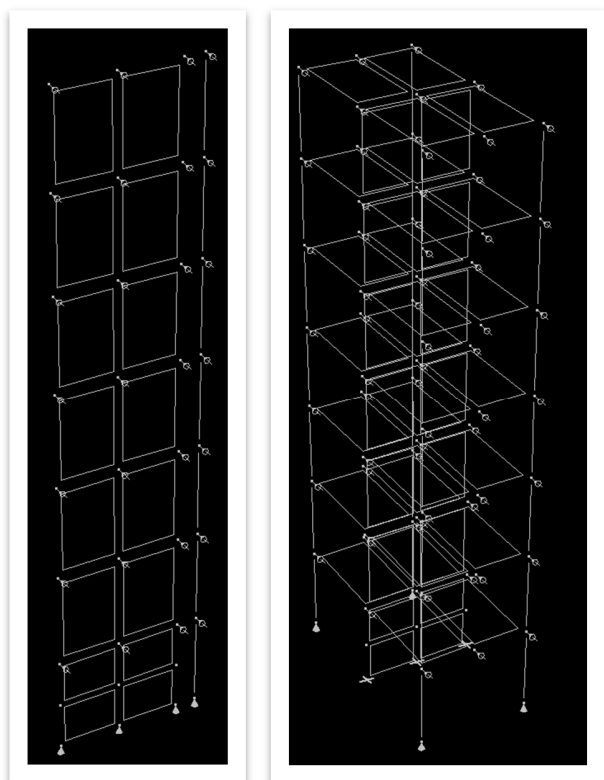


Ilustración 10. Modelos en PERFORM 3D con y sin modelación de losa y columnas.

Tabla 3. Descripción de modelos generados.

Prefijo	Descripción	Descripción de los análisis (Sufijo)
UCSD_1	Modelo de solo muros. Modelo de concreto bilineal. Discretización gruesa de fibras. 100 % rigidez de losas. Material de corte fisurado.	-P1_Sismo: 2% amortiguamiento Rayleigh - tiene en cuenta efecto p-delta.
UCSD_1_T1	Modelo de solo muros. El concreto en los elementos de piso 2 a 6 se discretiza dividiendo el área total de la sección transversal en 22 elementos. Así para cada sección de muro se tienen 11 fibras de concreto con el área respectiva. Con esto se consigue el máximo de fibras que se pueden alcanzar por elemento que es de 16, teniendo en cuenta que las de acero son 5 por sección de muro. Modelo de concreto bilineal. 100 % rigidez de losas. Material de corte fisurado.	-P1_Sismo: 2% amortiguamiento Rayleigh - tiene en cuenta efecto p-delta. -P2_Sismo: 5% amortiguamiento Rayleigh - tiene en cuenta efecto p-delta.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Prefijo	Descripción	Descripción de los análisis (Sufijo)
UCSD_2_S	Modelo de losas. Modelo del concreto bilineal. Discretización gruesa de fibras. 100 % rigidez de losas. Material de corte fisurado.	-P1_0%: 0% de amortiguamiento de Rayleigh - No tiene en cuenta el efecto p-delta - No tiene en cuenta la pérdida de rigidez del elemento -P2_0%: 0% amortiguamiento Rayleigh - Tiene en cuenta efecto p-delta -P3_2%: 2% de amortiguamiento de Rayleigh - Tiene en cuenta efecto p-delta -P3a_2%: 2% de amortiguamiento de Rayleigh - Sin tener en cuenta el efecto p-delta - Tiene en cuenta pérdida de rigidez de elementos. -P4_5%: 5% de amortiguamiento de Rayleigh - Tiene en cuenta efecto p-delta -P5_Ray_Mod: 2% de amortiguamiento modal para todos los modos - 0,2% de amortiguamiento de Rayleigh para abarcar los modos altos de desplazamiento y ser despreciable para los bajos por recomendación de manual de Perform 3d - Tiene en cuenta efecto p-delta
UCSD_2_S_1	Modelo de losas. En este modelo se modela la losa con un 75% de su rigidez inicial con el fin de determinar las variaciones al agregar pérdida de rigidez debido a posibles fisuraciones. Modelo del concreto bilineal. Discretización gruesa de fibras Material de corte fisurado.	-P6_2%: 2% de amortiguamiento de Rayleigh - Tiene en cuenta efecto p-delta - Tiene en cuenta pérdida de rigidez de los materiales.
UCSD_2_S_2	Modelo de losas. En este modelo se evalúa un modelo de concreto trilineal obtenido con el modelo de Mander con ayuda de SeismoStruct. Del artículo de Stephane Grange y Panagiotis Kotronis; Numerical model of seismic behaviour of a 7-Story building, se obtienen los parámetros del concreto que se usan como parámetros de entrada en el programa SeismoStruct para obtener la curva Esfuerzo-Deformación del concreto bajo la metodología de Mander. De esta manera se obtienen los valores necesarios para definir el material de concreto con factores de confinamiento de 1.0 ; 1.1 y 1.2. Con los valores de confinamiento se modelan las fibras del primer piso con las	P7_2%: 2% de amortiguamiento de Rayleigh - Tiene en cuenta efecto p-delta.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Prefijo	Descripción	Descripción de los análisis (Sufijo)
	<p>áreas confinadas por estribos generando fibras confinadas, Semiconfinadas y noconfinadas de acuerdo con la distribución de estribos correspondiente.</p> <p>De esta manera se manejan 3 modelos de concreto con factores de confinamiento de 1.0, 1.1 y 1.2 que se ingresan en la definición de la sección transversal.</p> <p>Discretización gruesa de fibras.</p> <p>100 % de rigidez de losas.</p> <p>Material de corte fisurado.</p>	
UCSD_2_S_3	<p>Modelo de losas.</p> <p>Se modifica el material de cortante trabajando sin fisuración del mismo. Es decir se considera un material de cortante para todo el edificio con el modulo G si modificar.</p> <p>Modelo del concreto bilineal.</p> <p>Discretización gruesa de fibras.</p> <p>100 % rigidez de losas.</p>	<p>P8_2%: 2% de amortiguamiento de Rayleigh -</p> <p>Tiene en cuenta efecto p-delta.</p>

El nombre de los modelos descritos anteriormente en la Tabla 3 y los cuales se mencionan más adelante en el trabajo, se componen del prefijo seguido por el sufijo dado por la descripción del análisis.

Con el fin de analizar la sensibilidad de los modelos ante la variación de los parámetros de entrada se generan varios modelos y casos de análisis de los que se obtienen variables de salida comparables con la respuesta experimental.

La estructura fue sometida a cuatro movimientos sísmicos en la mesa vibradora, denominados EQ1, EQ2, EQ3 y EQ4, de menor a mayor intensidad respectivamente. En las siguientes ilustraciones se observan las aceleraciones de los sismos en el tiempo.

La investigación centra especialmente en los resultados obtenidos a partir de los sismos de intensidad media-alta EQ2, EQ3 y EQ4, los cuales presentan las respuestas más interesantes desde el punto de vista del comportamiento no lineal de la estructura.

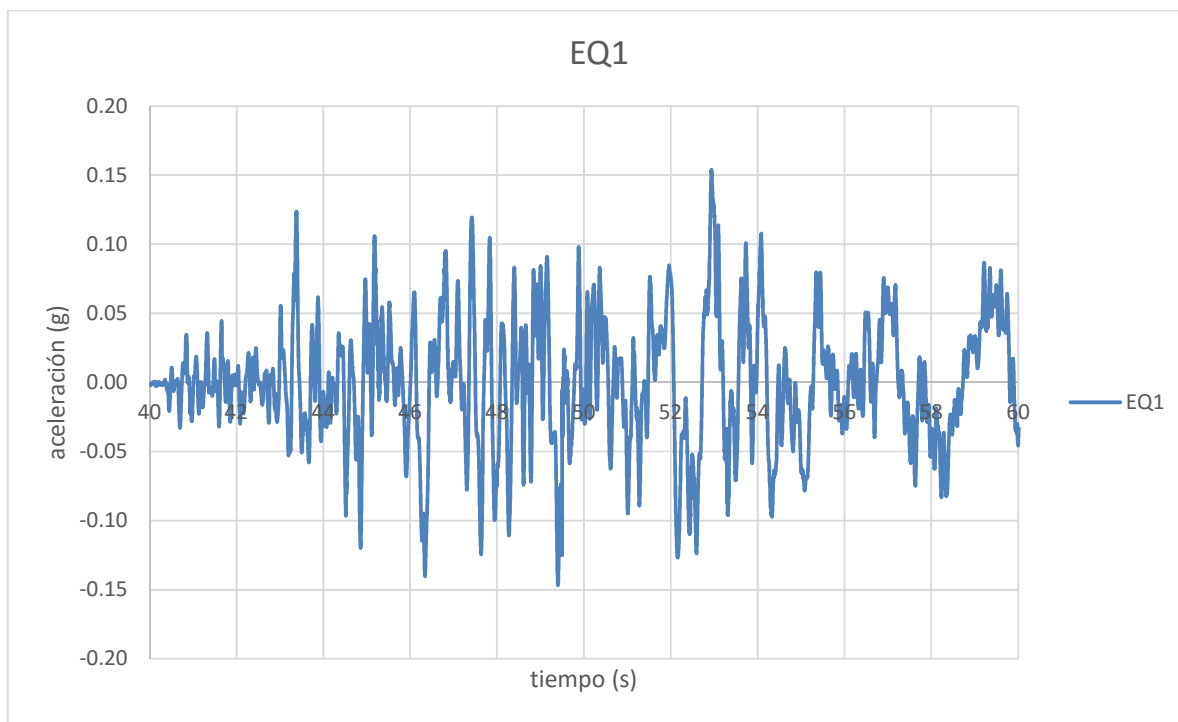


Ilustración 11. Aceleración Sismo EQ1

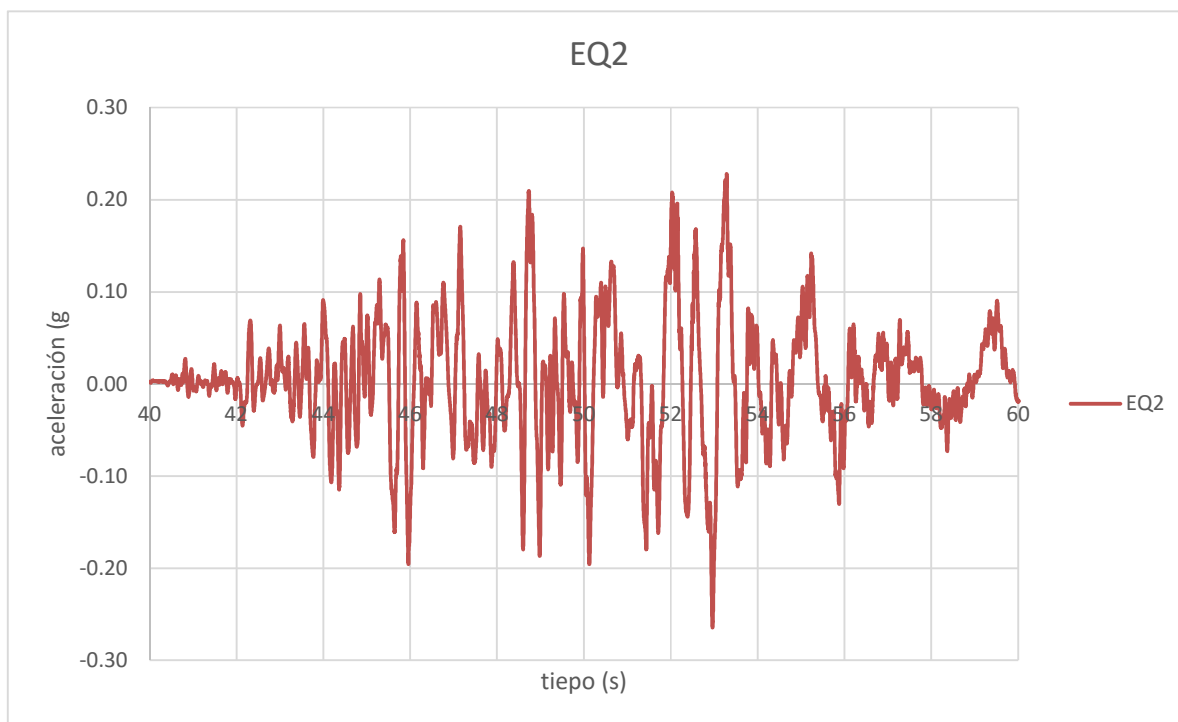


Ilustración 12. Aceleración Sismo EQ2

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

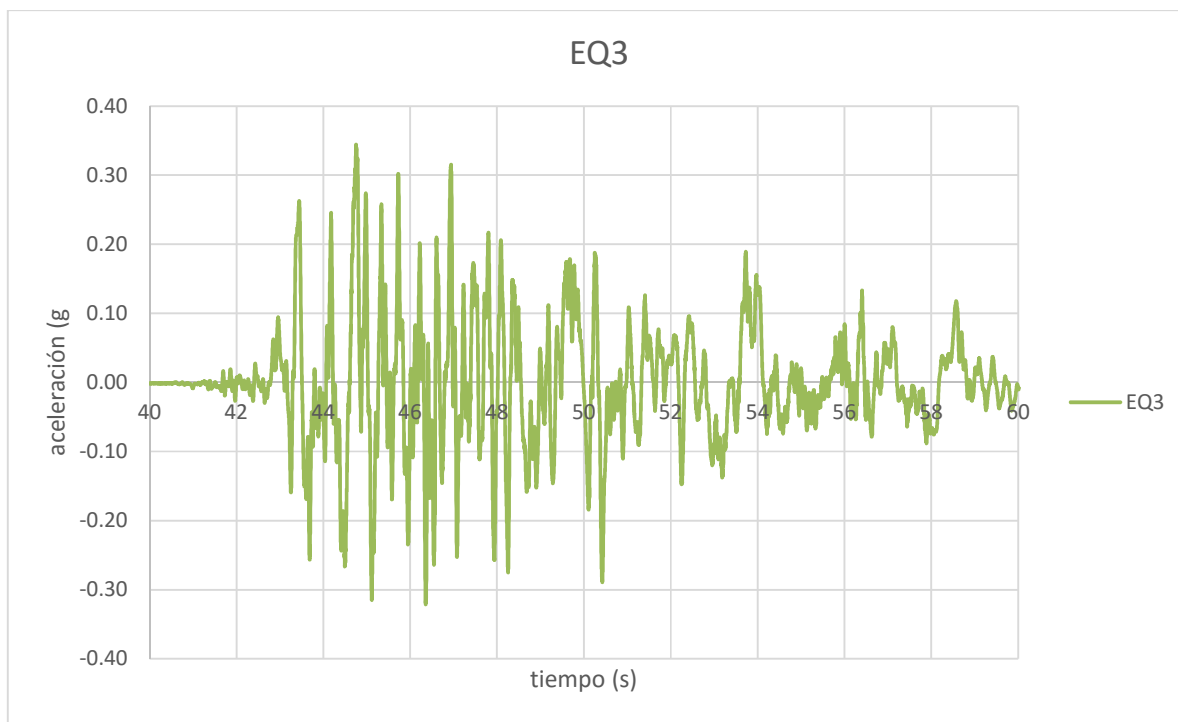


Ilustración 13. Aceleración Sismo EQ3

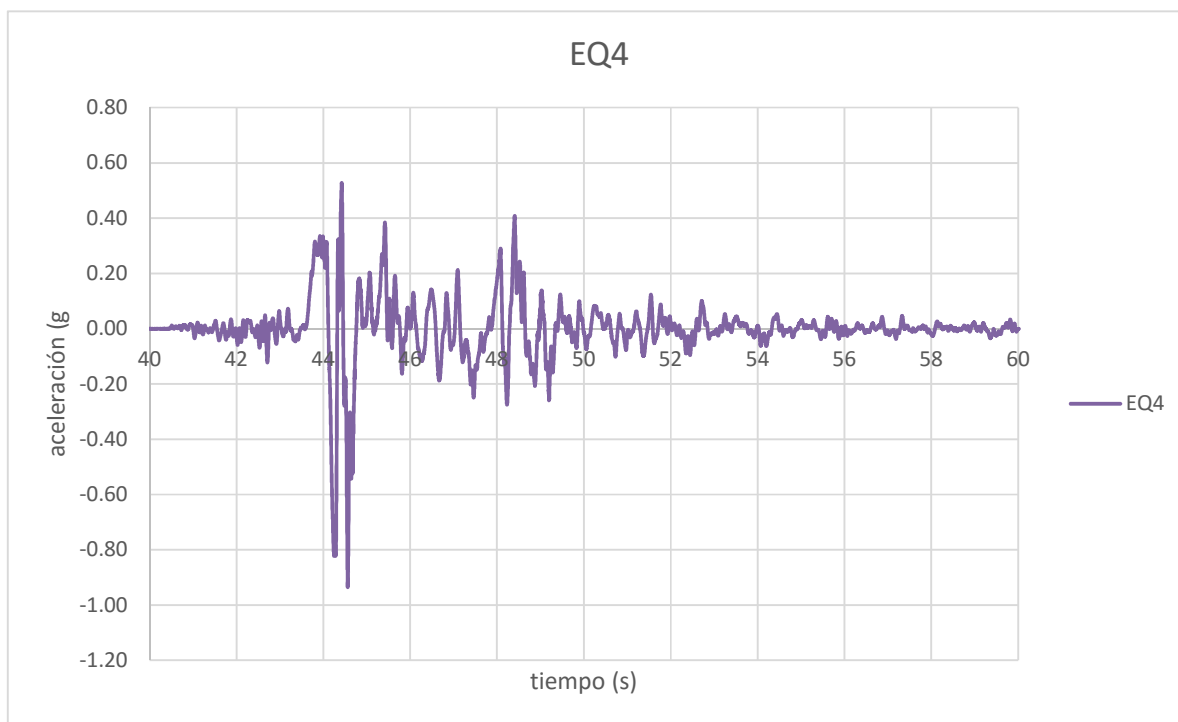


Ilustración 14. Aceleración Sismo EQ4

Para desarrollar el análisis de sensibilidad de los modelos, se obtiene el error relativo de los valores obtenidos para cada variable de salida, respecto al valor real o experimental.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El error relativo se calcula como la diferencia entre el valor experimental y el valor teórico dividido el valor experimental. Este valor puede ser negativo o positivo indicando si es por defecto o por exceso respectivamente. Se representa de manera porcentual, de manera que, si se tiene un error relativo del -10 % significa que el valor teórico obtenido es 0,1 veces menor que el valor experimental.

Se generan los rangos de valores mostrados en la Tabla 4 para clasificar cualitativamente los modelos partiendo de la base cuantitativa del error relativo.

Tabla 4. Rangos cualitativos del error relativo

Error relativo	Clasificación del modelo	Descripción
0 a ± 5 %	Muy bueno	Describe de manera precisa y acertada la respuesta de la estructura en la variable analizada
± 5 a ± 20 %	Aceptable	Describe de manera aceptable la respuesta de la estructura en la variable analizada
± 20 a ± 35 %	Regular	Describe de manera regular la respuesta de la estructura en la variable analizada
± 35 % en adelante	Malo	No describe correctamente el comportamiento de la estructura en la variable analizada

Para el alcance de este trabajo de grado se realiza el análisis de sensibilidad de los modelos para las siguientes variables de salida:

- Desplazamientos
- Derivas
- Aceleraciones

Para futuras investigaciones se encuentra pertinente ampliar el análisis a variables de salida como momentos y cortantes.

3.2.1 PARÁMETRO 1: DISCRETIZACIÓN DE LAS FIBRAS ESTRUCTURALES DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL:

3.2.1.1 DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 1 (ETAPA 2)

Para definir las secciones transversales en el software PERFORM 3D es necesario generar una distribución de fibras estructurales con cada uno de los materiales que participan dentro de la sección transversal.

Para el caso del muro estructural de hormigón reforzado, se deben generar fibras que representen la distribución de acero y concreto que previamente debieron ser caracterizados al definir los materiales.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El software permite generar un máximo de 16 fibras estructurales por elemento, entre las que se tienen que incluir tanto las de concreto como las de acero de refuerzo.

Existen dos opciones para generar las fibras. La primera se denomina “fixed size” o “tamaño fijo”, con esta opción el diseñador debe ingresar un área y unas coordenadas para cada una de las fibras que se vayan a ingresar, de esta manera el diseñador puede considerar cualquier tipo de geometría y distribución de refuerzo. La segunda opción se denomina “auto size” o “tamaño automático”, con esta opción el diseñador debe ingresar únicamente el espesor del muro y el número de fibras que desee discretizar. Con esto, el software calcula automáticamente las áreas y coordenadas de cada una. Con esta opción se simplifica el proceso de modelación, con la desventaja que solamente pueden modelarse muros con espesor constante y distribución de refuerzo uniforme en la sección.

3.2.1.2 MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 1 (ETAPA 3)

Con el fin de analizar este parámetro se implementaron dos modelos con definiciones de fibras diferentes, en ambos se usó la opción de “tamaño fijo” debido a la distribución no uniforme del acero de refuerzo en el muro.

En el primero, denominado UCSD_1 se plantea una definición gruesa de fibras en la sección transversal para los pisos 2 al 6. En la Ilustración 15 se observa la sección planteada. En este modelo, las fibras de concreto se concentran en áreas significativas por lo que resultan pocas fibras.

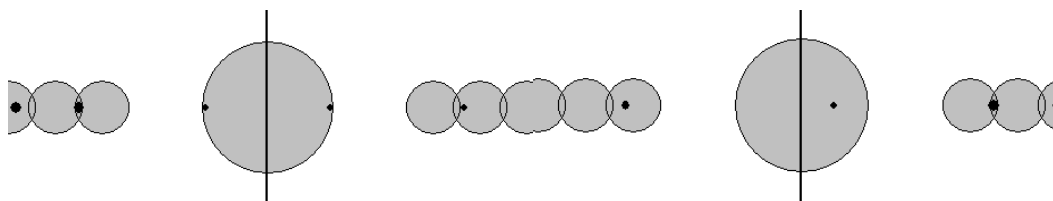


Ilustración 15. Sección transversal muro pisos 2 al 6 modelo UCSD_1

En el segundo modelo denominado UCSD_1_T1, se busca refinar más la discretización de las fibras en la sección transversal del muro, haciendo uso del máximo permitido por el software. En la Ilustración 16 se observa la sección planteada.

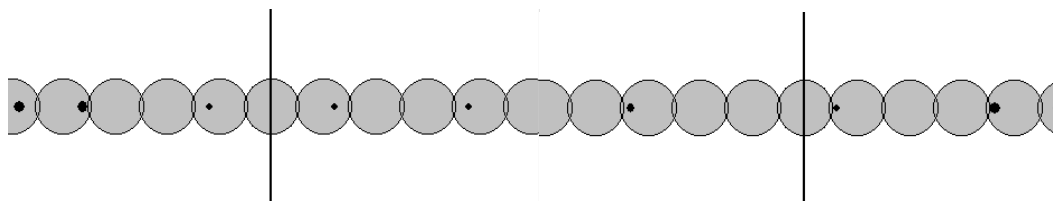


Ilustración 16. Sección transversal muro pisos 2 al 6 modelo UCSD_1_T1

3.2.1.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 1 (ETAPAS 4 Y 5)

Para la variable de desplazamiento en el piso 7 es posible identificar que no existe una diferencia significativa de la respuesta del modelo al detallar la sección de fibras. Para los sismos EQ2, EQ3 y EQ4 se obtuvo una diferencia en el error relativo de aproximadamente uno a dos puntos porcentuales. Un resultado similar se observa en la variable de las derivas, donde los modelos no difieren significativamente. Como se aprecia en la Ilustración 17 el modelo donde se detallan las fibras presenta un mejor resultado, sin embargo, como se ha comentado, la diferencia es casi despreciable.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Para representar la variable de desplazamiento del piso 7, ambos modelos tuvieron un desempeño aceptable, por el contrario, en la predicción de derivas ambos modelos sobre-estimaron la respuesta en más de 40 % al compararlos con los resultados experimentales.

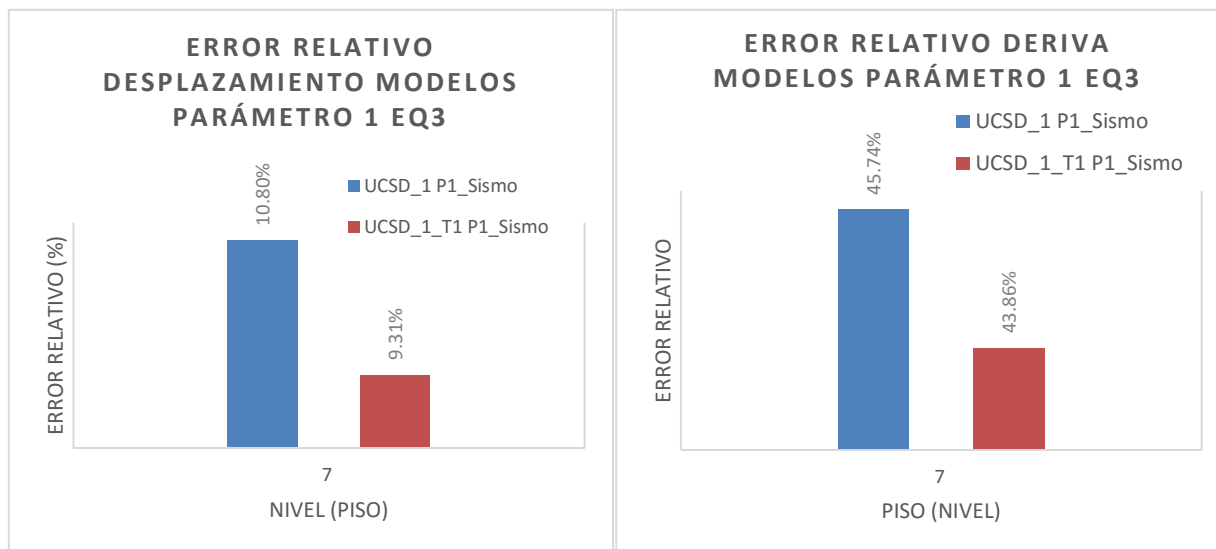


Ilustración 17. Error relativo desplazamiento y derivas modelos Parámetro 1

3.2.2 PARÁMETRO 2: MODELACIÓN DE LAS LOSAS:

3.2.2.1 DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 2 (ETAPA 2)

Esta variable tiene que ver con la decisión del diseñador de modelar las losas como elementos de superficie (tipo shell) u optar por definir ciertas restricciones en los nodos para modelar el comportamiento rígido de las losas de piso.

El software permite generar las losas como elementos “Slab or Shell, Elastic Section” para los cuales se debe definir previamente un material elástico del cual estará compuesto el elemento y un espesor efectivo que dependerá de las condiciones geométricas de cada losa. Una vez definidos estos elementos, se deben ubicar dentro de la estructura a partir de los 4 nodos de esquina.

El diseñador puede optar también por modelar las losas sin generar elementos tipo “Shell” simplemente representando la rigidez de la misma por medio de restricciones de traslación y rotación en los nodos de piso. Con esto es posible generar una representación de las losas de piso sin haber generado elementos adicionales en el modelo.

3.2.2.2 MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 2 (ETAPA 3)

Se generan dos modelos, uno donde se definen las losas por medio de restricciones en los nodos y otro donde se definen como elementos “Slab or Shell, Elastic Section”.

El primero se denomina UCSD_1_T1, en este modelo se generan restricciones en la traslación de los nodos de cada piso forzándolos a tener un comportamiento rígido.

El segundo se denomina UCSD_2_S, en este modelo se generan elementos tanto para las losas como para las columnas de gravedad o tacos. Las losas se definen como elementos elásticos con

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

las características geométricas correspondientes. Para la definición del material se usa un modelo lineal del concreto donde se definen tanto el módulo de elasticidad como el de Poisson.

3.2.2.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 2 (ETAPAS 4 Y 5)

En la Ilustración 18 se aprecia que al modelar las losas se obtiene un modelo muy bueno para predecir los desplazamientos debidos al sismo EQ2, a diferencia del modelo de solo muro, donde las predicciones no son buenas. Sin embargo, para el sismo EQ3 (Ilustración 19) no es tan sencillo concluir sobre la sensibilidad de este parámetro pues los resultados para el desplazamiento mínimo y máximo no muestran una tendencia. Se puede observar sin embargo como el modelo de losas subestima los desplazamientos, mientras el de solo muro los sobreestima. En general es posible observar una tendencia del modelo UCSD_2_P3_2% a predecir mejor los desplazamientos del piso 7 de la estructura, sin embargo es difícil afirmarlo con claridad debido a lo que sucede en la respuesta de desplazamientos máximos para el sismo EQ3 donde la tendencia se rompe y el modelo del muro simple obtiene un error relativo menor.

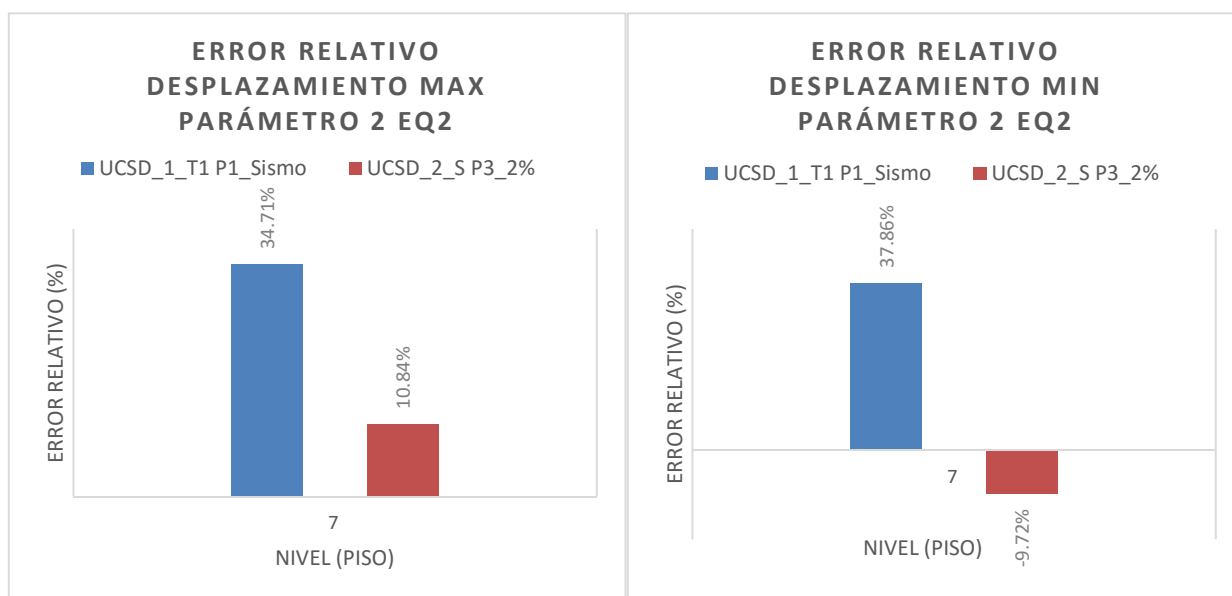


Ilustración 18. Error relativo desplazamientos parámetro 2 EQ2

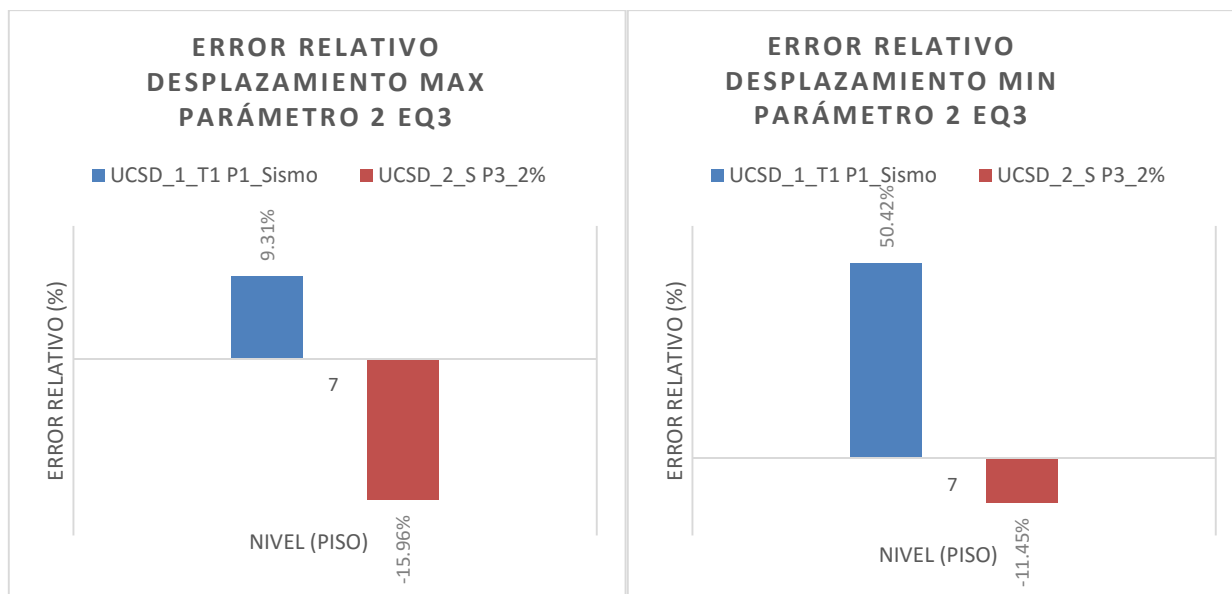


Ilustración 19. Error relativo desplazamientos parámetro 2 EQ3

Para las derivas se observa una clarísima superioridad del modelo de losas sobre el modelo de solo muro. Como se observa en la Ilustración 20 y la Ilustración 21, para ambos casos de sismo el modelo UCSD_2_P3_2% obtiene siempre resultados con errores relativos significativamente menores que el modelo UCSD_1_T1 P1_Sismo. Con esta tendencia, es fácil afirmar la importancia de este parámetro (parámetro 2) sobre la respuesta de las derivas.

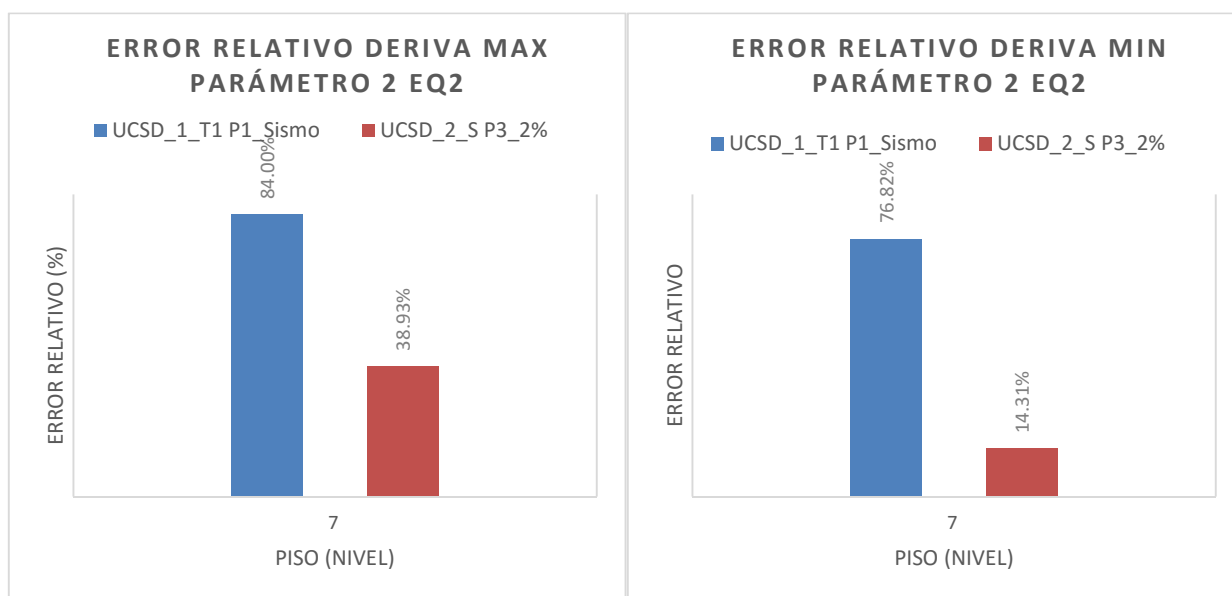


Ilustración 20. Error relativo deriva parámetro 2 EQ2

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

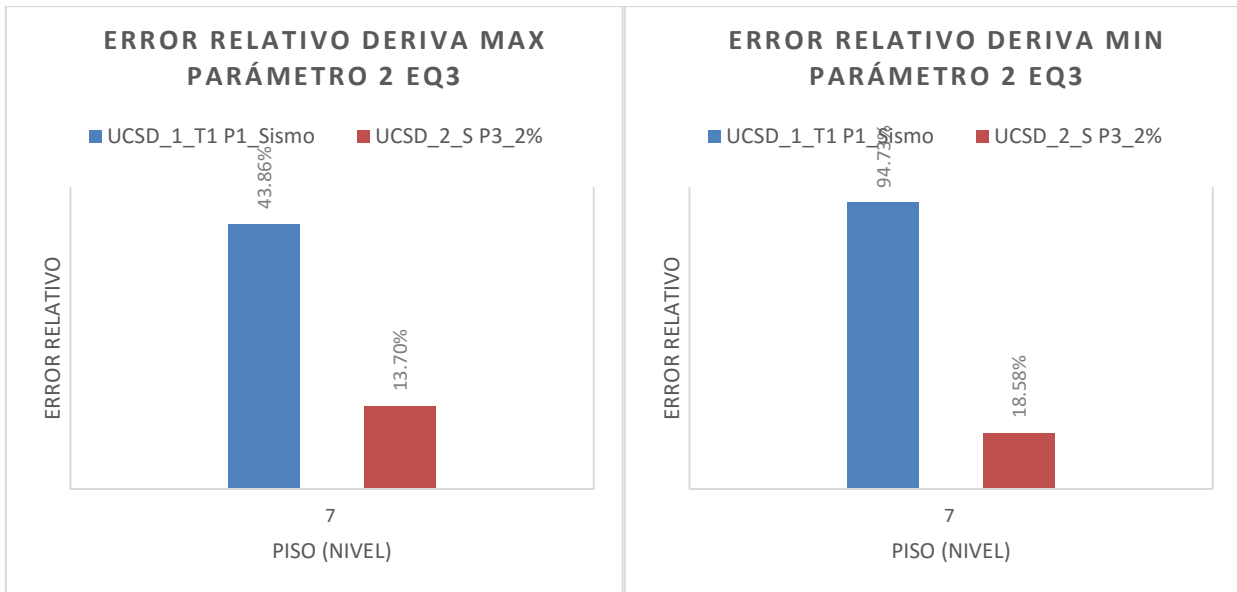


Ilustración 21. Error relativo deriva parámetro 2 EQ3

Al analizar la variable de aceleraciones se encuentran errores demasiado altos en los modelos de losas. Se encuentra sin embargo que, al ignorar el efecto P-delta en el análisis, las aceleraciones se acercan un poco más a las experimentales. No obstante como se observa en la Ilustración 22 y la Ilustración 23 el modelo sin losa predice de forma aceptable las aceleraciones del piso 7 mientras el modelo de losas sin efecto p-delta lo hace de forma regular.

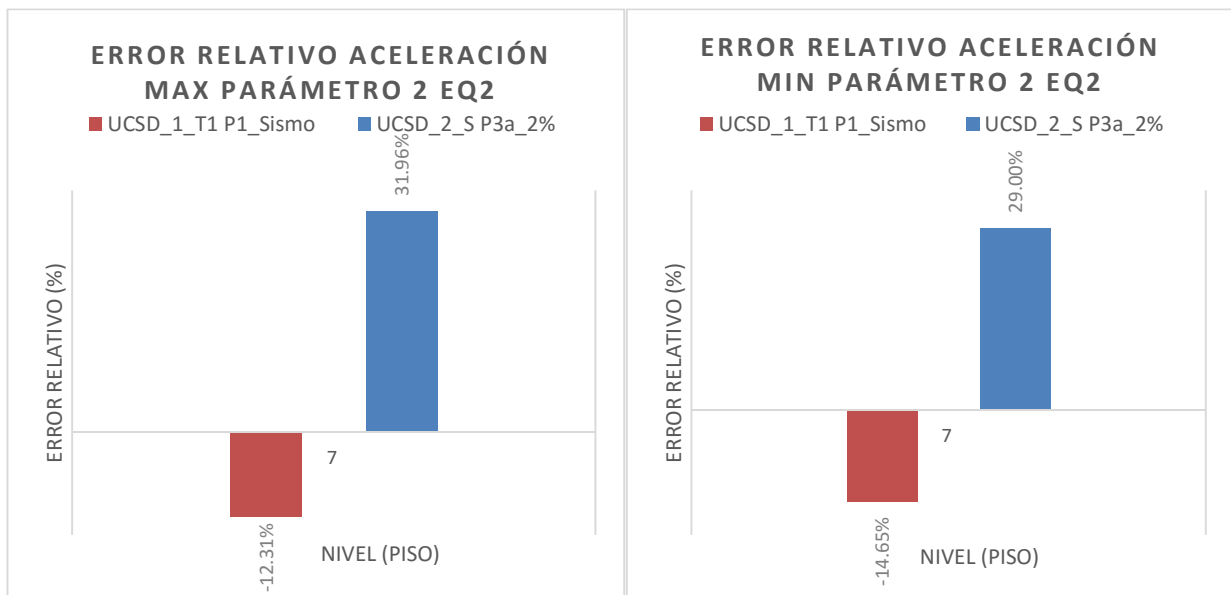


Ilustración 22. Error relativo aceleración parámetro 2 EQ2

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

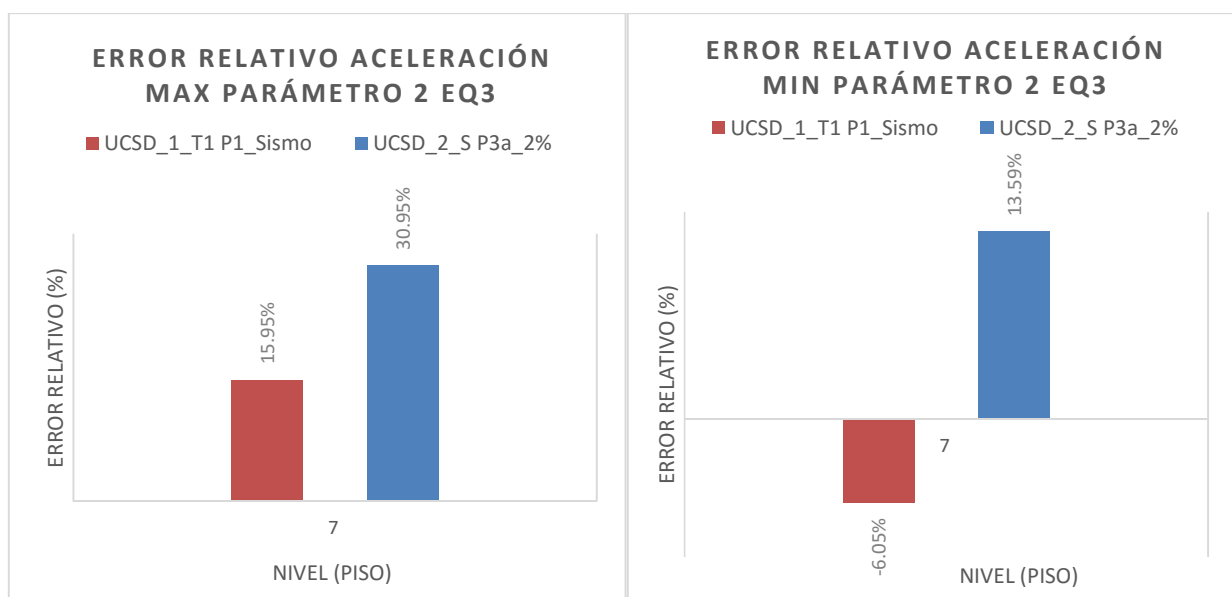


Ilustración 23. Error relativo aceleración parámetro 2 EQ3

3.2.3 PARÁMETRO 3: EFECTO P-DELTA:

3.2.3.1 DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 3 (ETAPA 2)

El software permite considerar o no el efecto p-delta como parte del análisis no lineal cronológico a la hora de correr el análisis, de esta manera es posible y recomendable realizar un primer análisis sin considerar este efecto para confirmar que los resultados se encuentren dentro de los valores esperados.

De acuerdo con M.Abell (2013) “el efecto p-delta, también conocido como no linealidad geométrica, involucra las relaciones de equilibrio y compatibilidad de un sistema estructural cargado con su forma deformada”. El efecto se da por la influencia de la carga gravitacional en el sistema al presentarse un desplazamiento lateral significativo. Este efecto puede contribuir a la pérdida de resistencia lateral llevando a deformaciones residuales e inestabilidad dinámica.

3.2.3.2 MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 3 (ETAPA 3)

Con el fin de analizar la influencia de este parámetro en la respuesta teórica se definen dos modelos, uno sin tener en cuenta el efecto p-delta y otro teniéndolo en cuenta. Los modelos se denominan UCSD_2_S P3a_2% y UCSD_2_S P3_2% respectivamente. El software permite agregar o descartar este parámetro de manera simple con solo marcar o desmarcar una casilla en la ventana de análisis.

3.2.3.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 3 (ETAPAS 4 Y 5)

De acuerdo con las Ilustración 24, 23 y 24 existe una ligera diferencia a favor del modelo que tiene en cuenta el efecto p-delta en cuanto a predecir la variable de desplazamiento en los sismos EQ2, EQ3 y EQ4, sin embargo, si se observa de cerca, dicha diferencia es bastante baja, alrededor de un punto porcentual, lo cual puede resultar poco significativo.

Un análisis similar se puede hacer para la respuesta en los valores de deriva. En general se observa una mejor predicción del modelo que considera el efecto p-delta, sin embargo la diferencia es mínima.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Cabía esperar que el efecto p-delta, al tener una relación estrecha con la no linealidad geométrica, fuera un parámetro de gran sensibilidad para el modelo en los sismos de intensidad alta como el sismo EQ4, sin embargo, al menos para las variables de salida analizadas, se observa que su influencia en la respuesta es baja (ver Ilustración 26 e Ilustración 29).

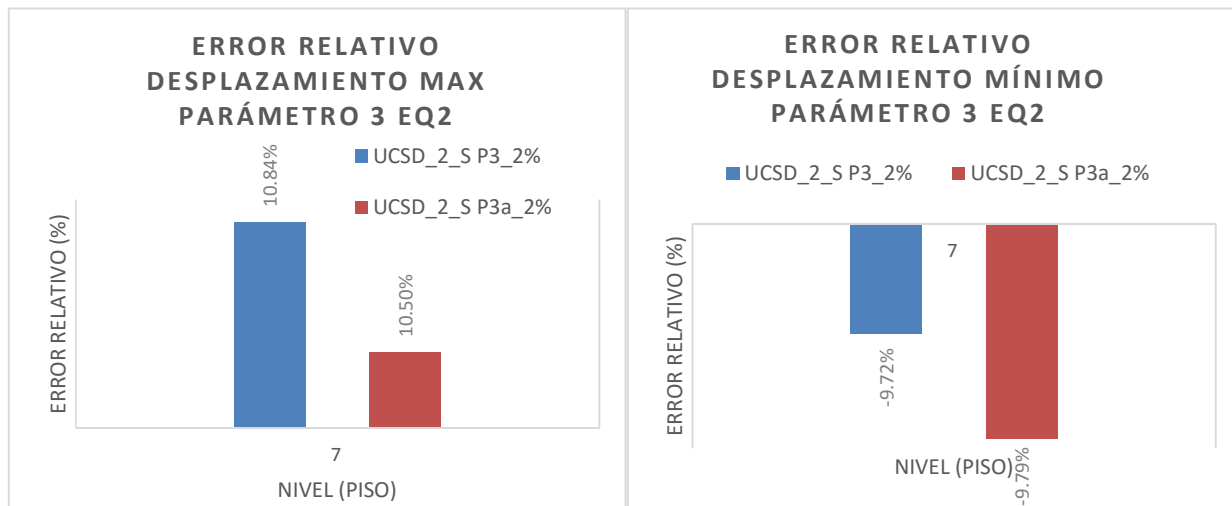


Ilustración 24. Error relativo desplazamientos parámetro 3 EQ2

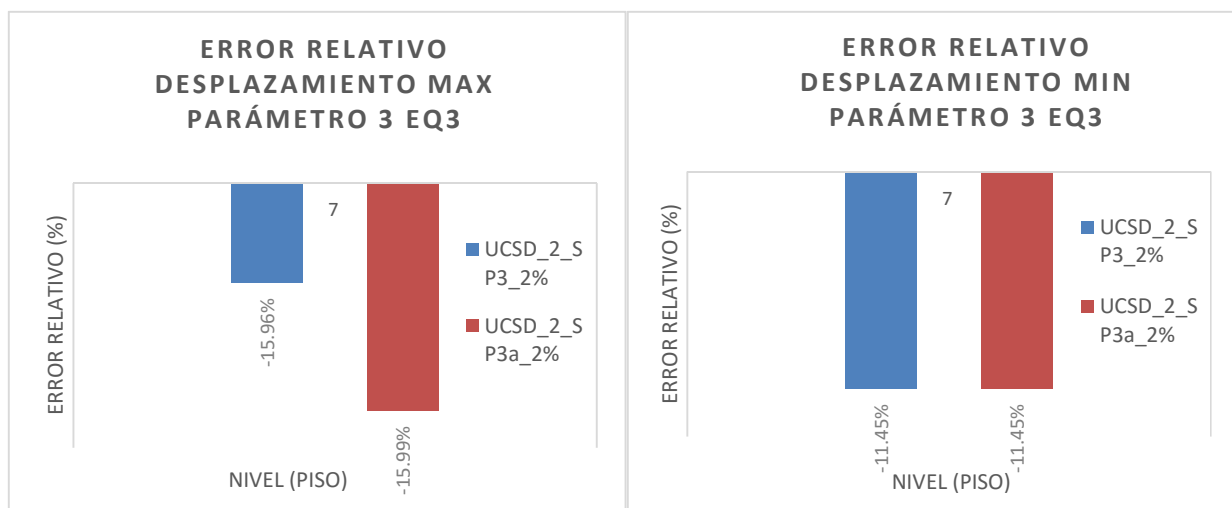


Ilustración 25. Error relativo desplazamientos parámetro 3 EQ3

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

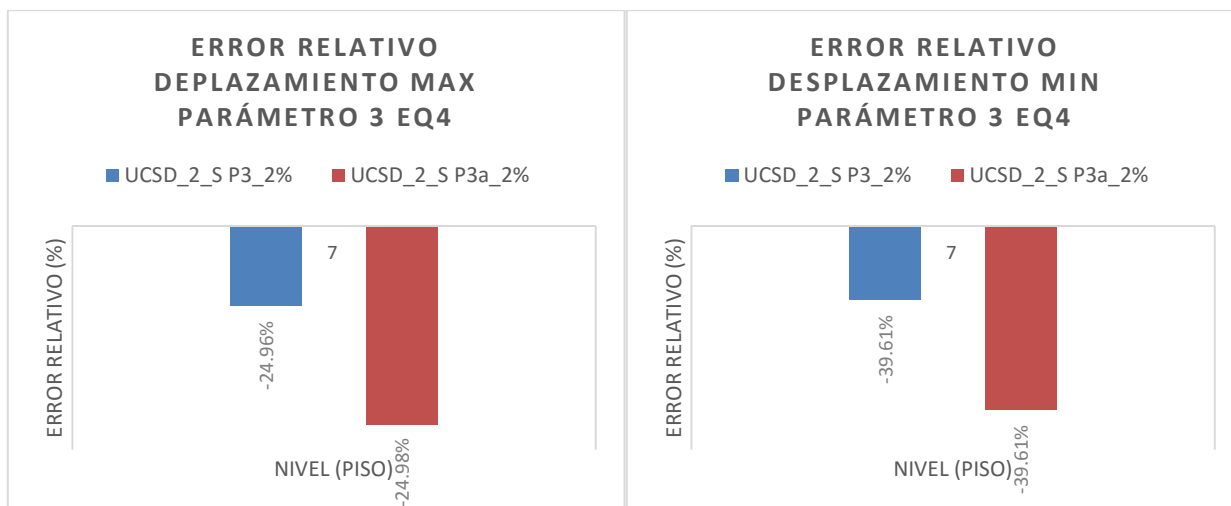


Ilustración 26. Error relativo desplazamientos parámetro 3 EQ4

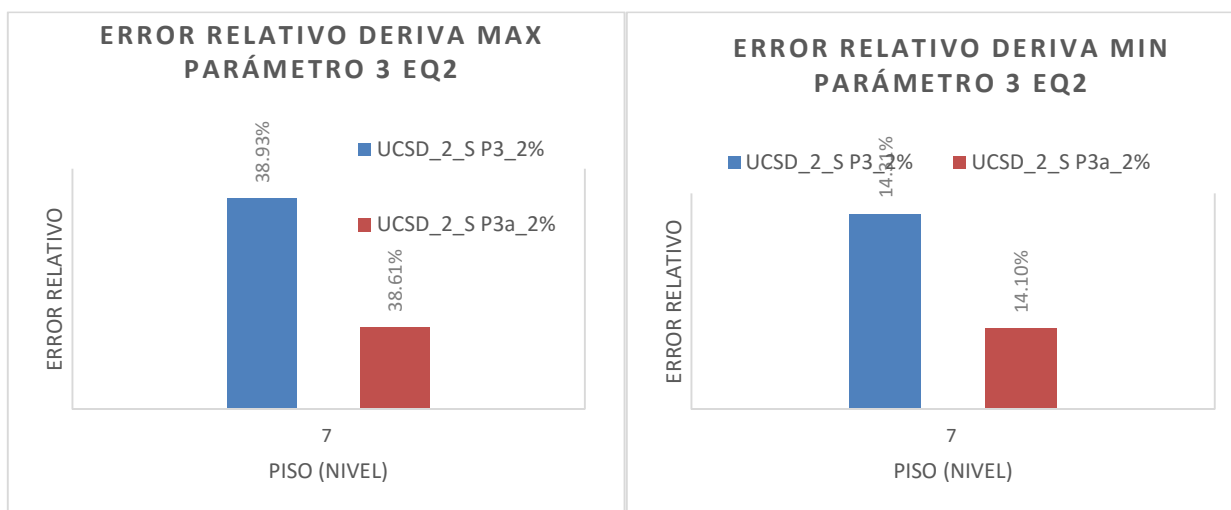


Ilustración 27. Error relativo derivas parámetro 3 EQ1

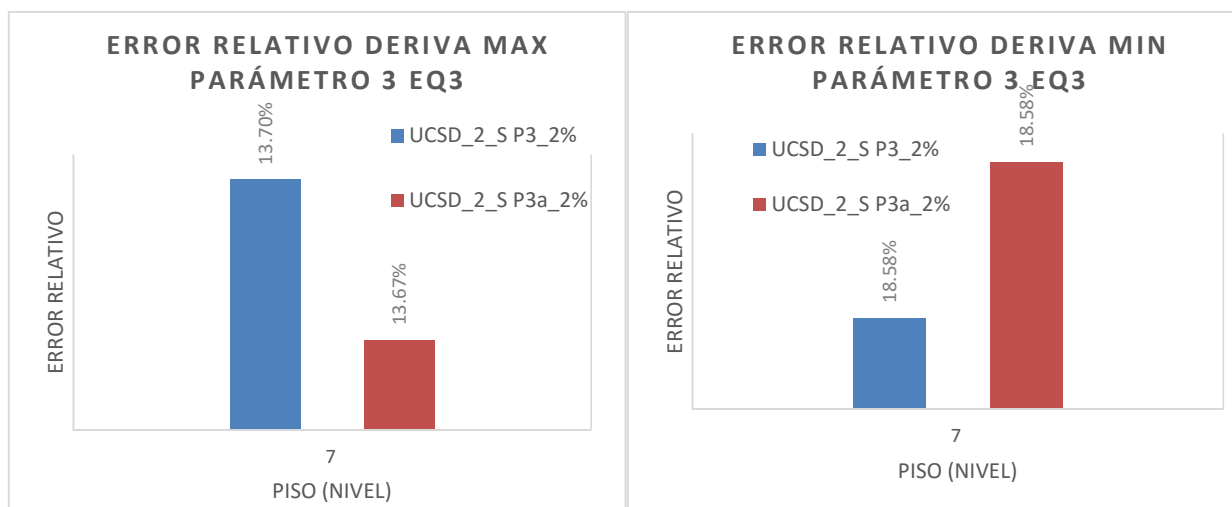


Ilustración 28. Error relativo derivas parámetro 3 EQ3

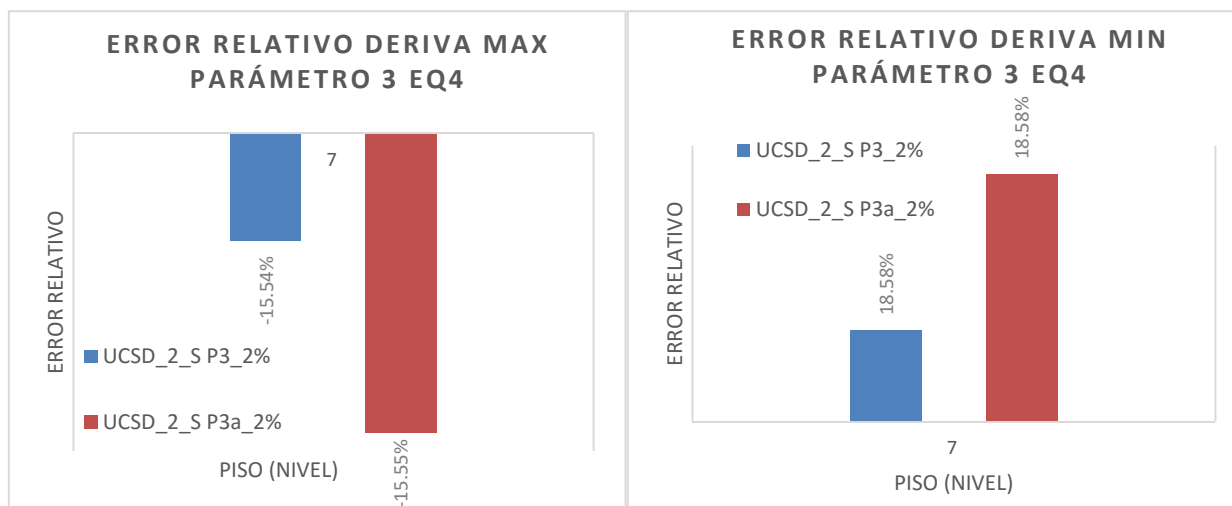


Ilustración 29. Error relativo derivas parámetro 3 EQ4

3.2.4 PARÁMETRO 4: AMORTIGUAMIENTO

3.2.4.1 DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 4 (ETAPA 2)

El software permite realizar análisis considerando diferentes modelos y valores de amortiguamiento de la estructura. Se permite aplicar el modelo de amortiguamiento de Rayleigh, el Modal y una combinación de ambos.

En el marco de referencia en los numerales 1.4.4 y 1.4.5 se definen las características de cada uno de los modelos de amortiguamiento.

3.2.4.2 MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 4 (ETAPA 3)

A continuación se describen los modelos generados para analizar influencia de este parámetro en la respuesta teórica de la estructura:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

UCSD_2_S P2_0%: Cero por ciento de amortiguamiento en toda la estructura.

UCSD_2_S P3_2%: Dos por ciento de amortiguamiento de Rayleigh.

UCSD_2_S P4_5%: Cinco por ciento de amortiguamiento de Rayleigh.

UCSD_2_S P5_Ray_Mod: Combinación de ambos modelos de amortiguamiento. Dos por ciento de amortiguamiento modal para los modos básicos y 0,2 por ciento de amortiguamiento de Rayleigh para los modos altos.

3.2.4.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 4 (ETAPAS 4 Y 5)

Para el sismo EQ2, se observa que el modelo que considera un 2 % de amortiguamiento de Rayleigh da las mejores predicciones de desplazamiento ubicándose en un rango aceptable. En el sismo EQ3, se observa como la mejor predicción se obtiene al considerar 0 % de amortiguamiento en la estructura. Para el sismo EQ4 de intensidad alta, se observa como el modelo con 0 % de amortiguamiento definitivamente representa mejor la respuesta de la estructura en cuanto a desplazamiento del techo, sin embargo, subestima la respuesta. Se observa que el modelo que asume amortiguamiento del 5 % da los peores resultados de desplazamiento para los 3 sismos, subestimando en todos los casos la respuesta experimental.

El modelo que combina el amortiguamiento Modal con el de Rayleigh está en un rango aceptable de predicción para el análisis de sismos EQ2 y EQ3, sin embargo se encuentra en el rango malo para el sismo de intensidad alta, EQ4.

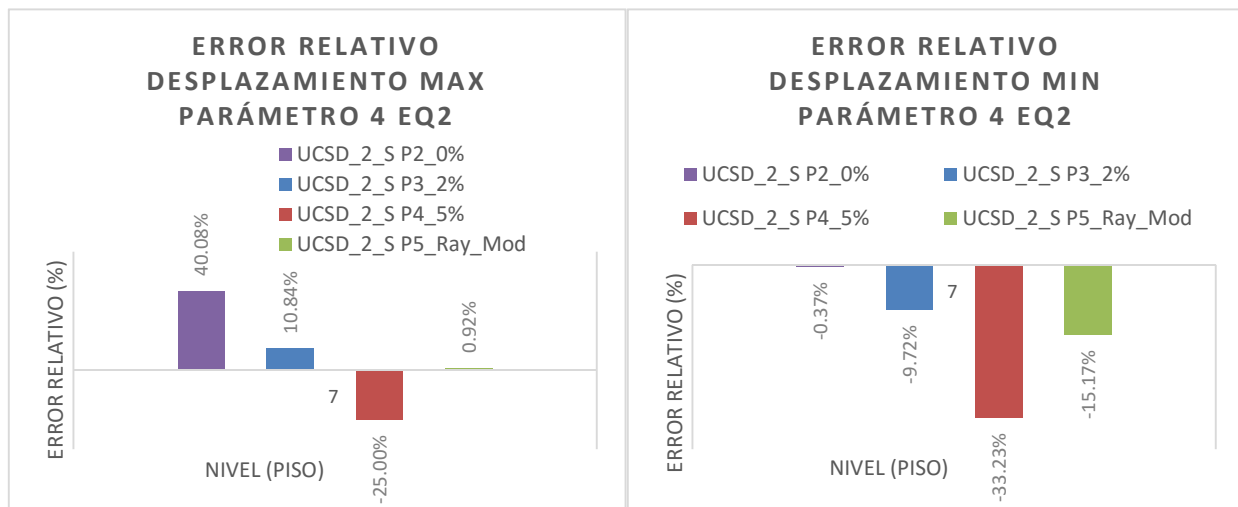


Ilustración 30. Error relativo desplazamientos parámetro 4 EQ2

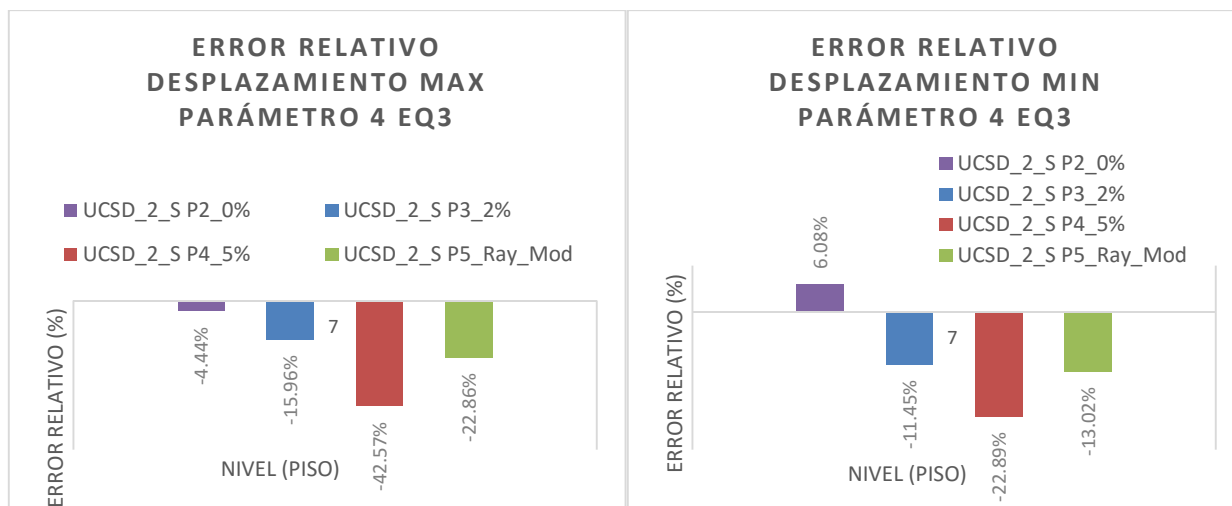


Ilustración 31. Error relativo desplazamientos parámetro 4 EQ3

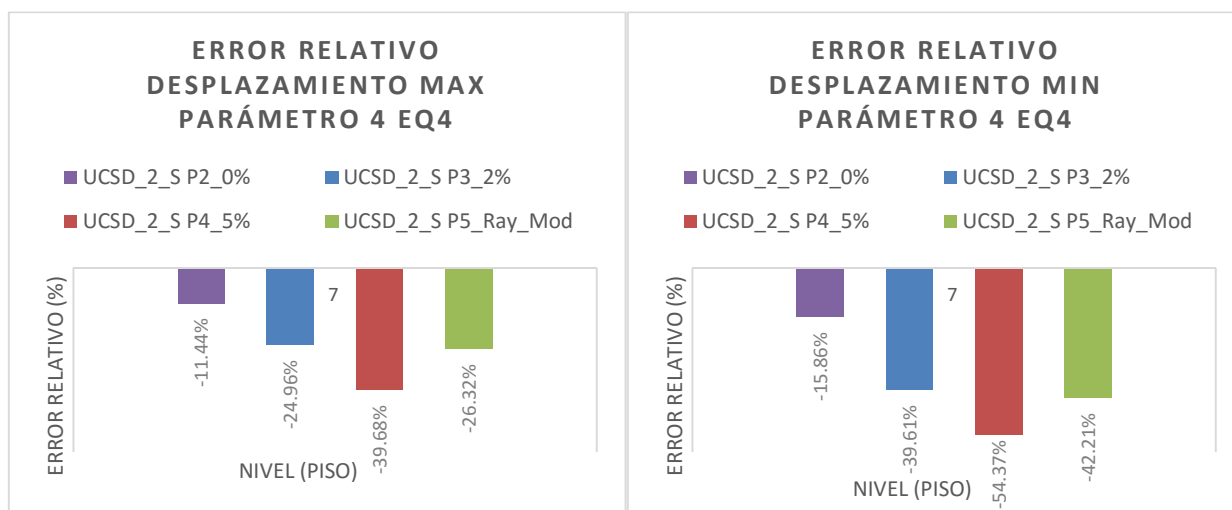


Ilustración 32. Error relativo desplazamientos parámetro 4 EQ4

Como se observa en la Ilustración 33 el modelo que predice mejor la respuesta de la deriva para el sismo EQ2 es el que asume un amortiguamiento del 5 % de Rayleigh. Las respuestas de este modelo están en un intervalo entre Muy bueno y Aceptable de acuerdo con lo definido en la Tabla 4. Para este movimiento sísmico se observa que asumir 2 % de amortiguamiento puede sobreestimar las derivas en un alto porcentaje. En el modelo que combina el amortiguamiento Modal con el de Rayleigh se observa una gran diferencia en la predicción de la deriva positiva y la negativa, al igual que el modelo con 2 % de amortiguamiento de Rayleigh, por lo cual es difícil concluir sobre los resultados.

Para la predicción de la deriva en el sismo EQ3 (Ilustración 34), se observa que todos los modelos, excepto el que asume 0 % de amortiguamiento están en un rango Aceptable de predicción.

Como se observa en la Ilustración 35, la mejor predicción de la deriva para el sismo de intensidad alta EQ4 es el que asume 0 % de amortiguamiento, el cual se encuentra en un rango de predicción muy bueno, mientras los otros varían de Regular a Malo. En dicha ilustración se

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

observa también como, para el sismo EQ4, aumentar el amortiguamiento de la estructura puede subestimar las derivas en gran porcentaje.

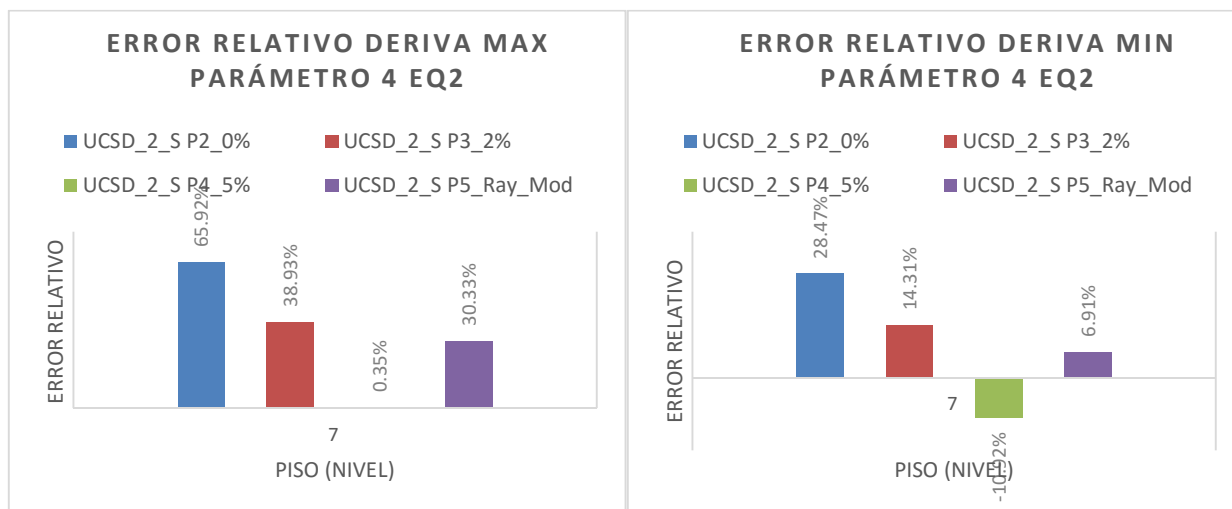


Ilustración 33. Error relativo derivas parámetro 4 EQ2

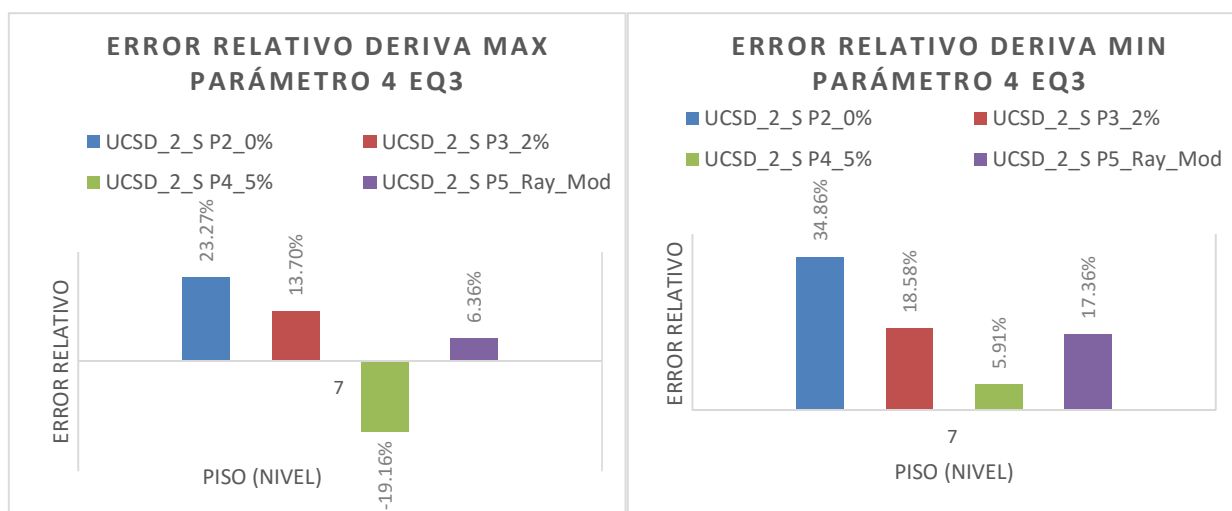


Ilustración 34. Error relativo derivas parámetro 4 EQ3

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

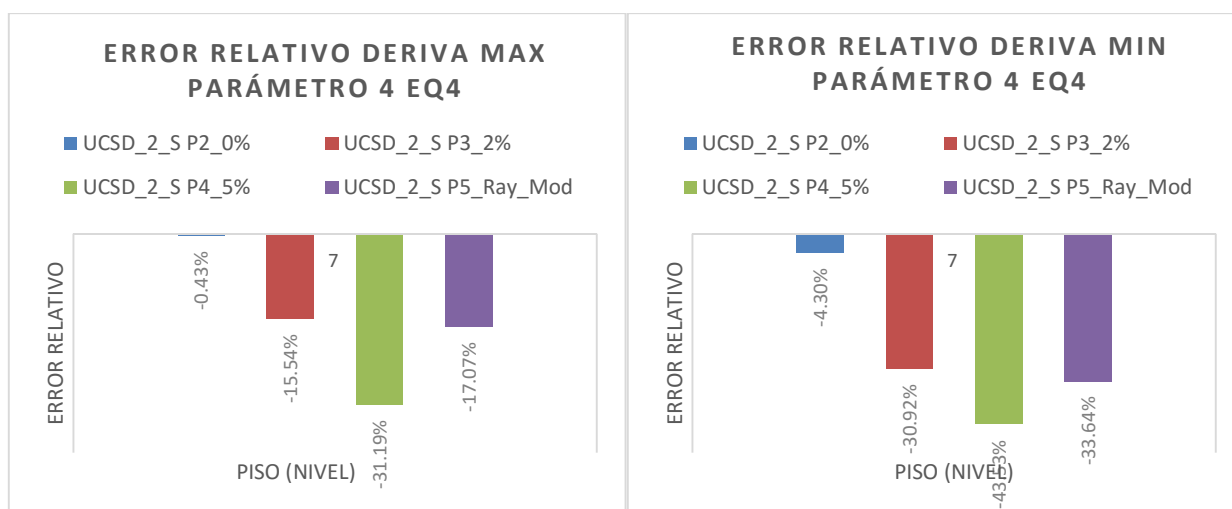


Ilustración 35. Error relativo derivas parámetro 4 EQ4

3.2.5 PARÁMETRO 5: MODELO DEL CONCRETO

3.2.5.1 DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 5 (ETAPA 2)

El software permite caracterizar el material de concreto con relaciones de deformación bilineal o trilineal. Al definir una relación bilineal, el diseñador debe especificar el módulo de elasticidad del material, así como su resistencia a la compresión y la deformación máxima. De esta manera se obtiene una relación con la forma mostrada en la Ilustración 36 donde el eje horizontal representa la deformación unitaria y el vertical el esfuerzo aplicado.

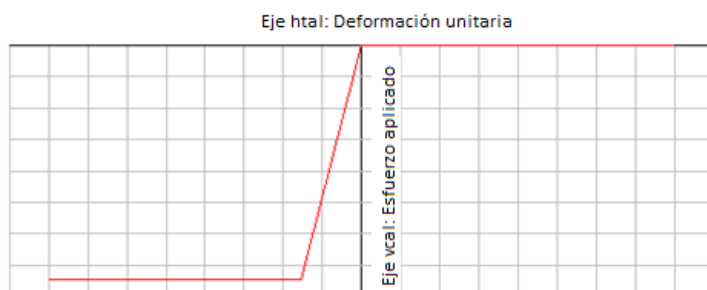


Ilustración 36. Forma de la relación bilineal del material de concreto (sistema ingles de unidades de esfuerzo)

Por otro lado, cuando se define una relación trilineal, el diseñador debe especificar el módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión de fluencia, la resistencia a la compresión máxima y las deformaciones unitarias correspondientes. De esta manera se obtiene una relación esfuerzo deformación con la forma mostrada en la Ilustración 37 donde el eje horizontal representa la deformación unitaria y el vertical el esfuerzo aplicado.

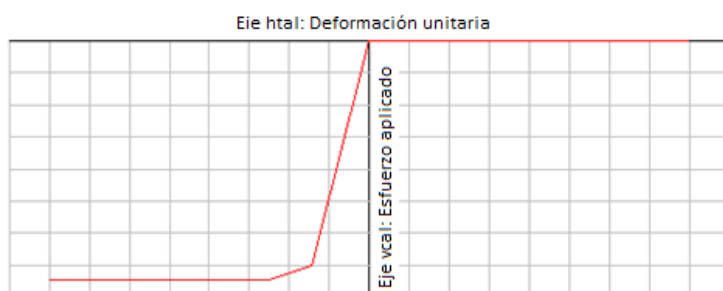


Ilustración 37. Forma de la relación trilineal del material de concreto (sistema internacional de unidades de esfuerzo)

Es posible también definir dentro de las características del material de concreto parámetros como: fuerza de tracción, degradación cíclica, pérdida de resistencia y capacidades de deformación. No es sencillo sin embargo aplicar estos parámetros si no se tiene una información precisa del material, por lo que es opcional tenerlos en cuenta dentro de la caracterización.

3.2.5.2 MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 5 (ETAPA 3)

Se generan dos modelos para evaluar la influencia en la variación de este parámetro y se describen a continuación.

UCSD_2_S: En este modelo se caracteriza el concreto con una relación bilineal. Además se usa el mismo tipo de concreto a lo largo de toda la sección transversal. Las características del material se muestran en la Ilustración 38, donde las unidades de longitud están en pulgadas y las de fuerza en kilo-libras (kip).

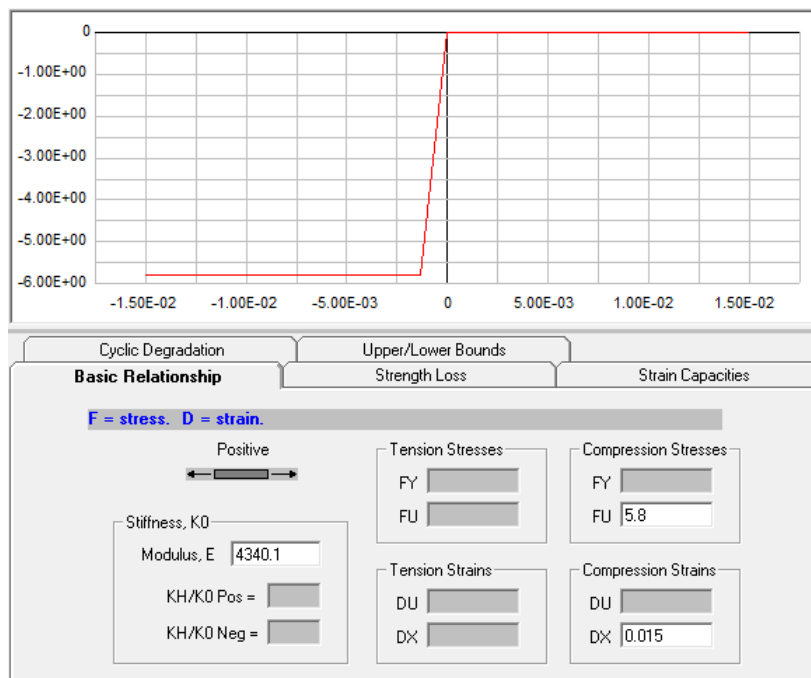


Ilustración 38. Relación bilineal definida para el concreto

UCSD_2_S_2: En este modelo se caracteriza el concreto con una relación trilineal. Se definen 3 tipos de materiales de concreto para caracterizar el grado de confinamiento con un material

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

confinado, uno medianamente confinado y otro sin confinar. Las características de cada uno se observan en las siguientes ilustraciones, donde las unidades de longitud están en metros (m) y las de fuerza en Newton (N).

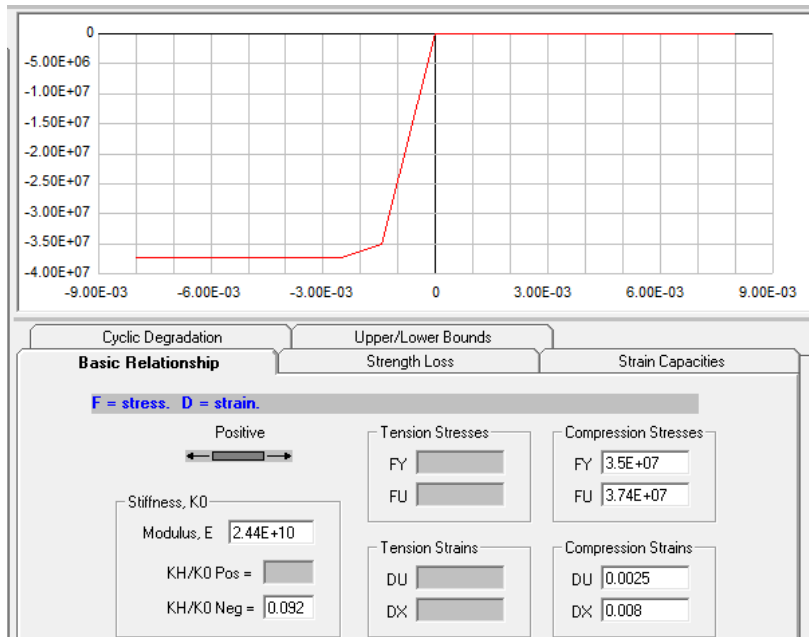


Ilustración 39. Relación trilineal definida para el concreto no confinado

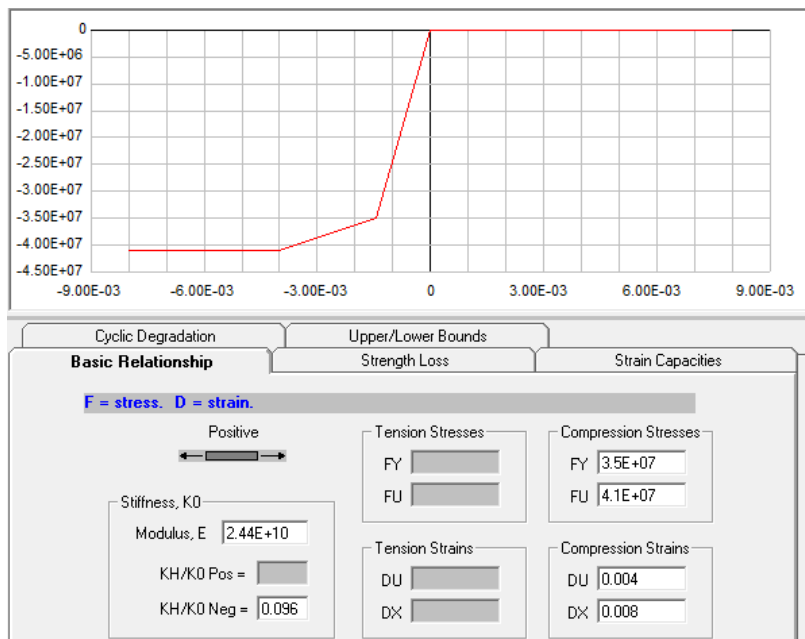


Ilustración 40. Relación trilineal definida para el concreto medianamente confinado

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

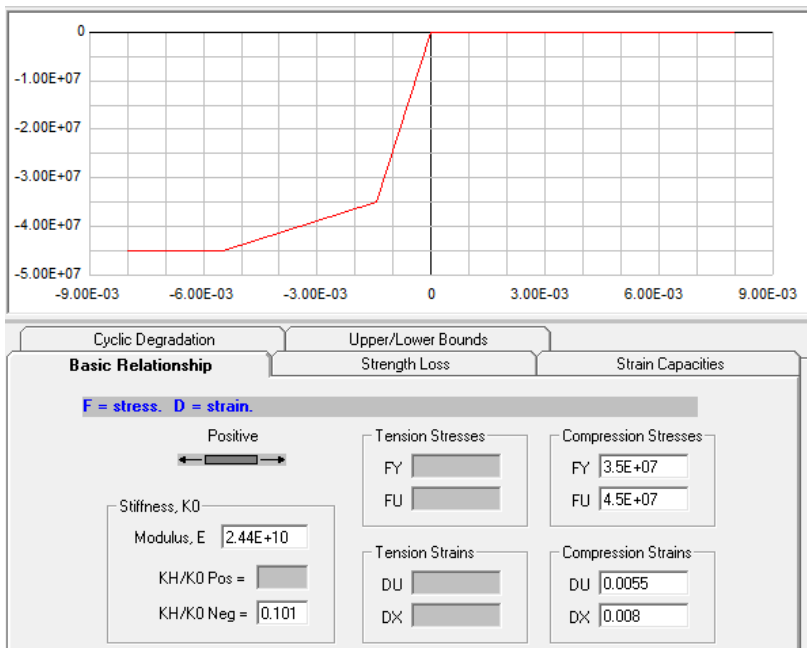


Ilustración 41. Relación trilineal definida para el concreto confinado

3.2.5.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 5 (ETAPAS 4 Y 5)

En las Ilustración 42, 41 y 42 se observa como la caracterización del concreto en modelos bilineales o trilineales genera poca sensibilidad en la respuesta del modelo en el desplazamiento del piso 7. Las variaciones en el error relativo para los sismos considerados son del orden de un punto porcentual, lo cual indica una baja significancia de este parámetro en cuanto a la respuesta de desplazamientos.

Se observa cómo, para los sismos EQ2 y EQ3, el error relativo de los modelos comparados varía para la respuesta del desplazamiento máximo y el mínimo, por lo que no se puede afirmar que exista una superioridad de uno de los modelos en la predicción de la respuesta. En el sismo EQ4 sin embargo, se observa que tanto para el desplazamiento máximo como para el mínimo la respuesta del modelo que incluye las características trilineales y de confinamiento, es ligeramente superior.

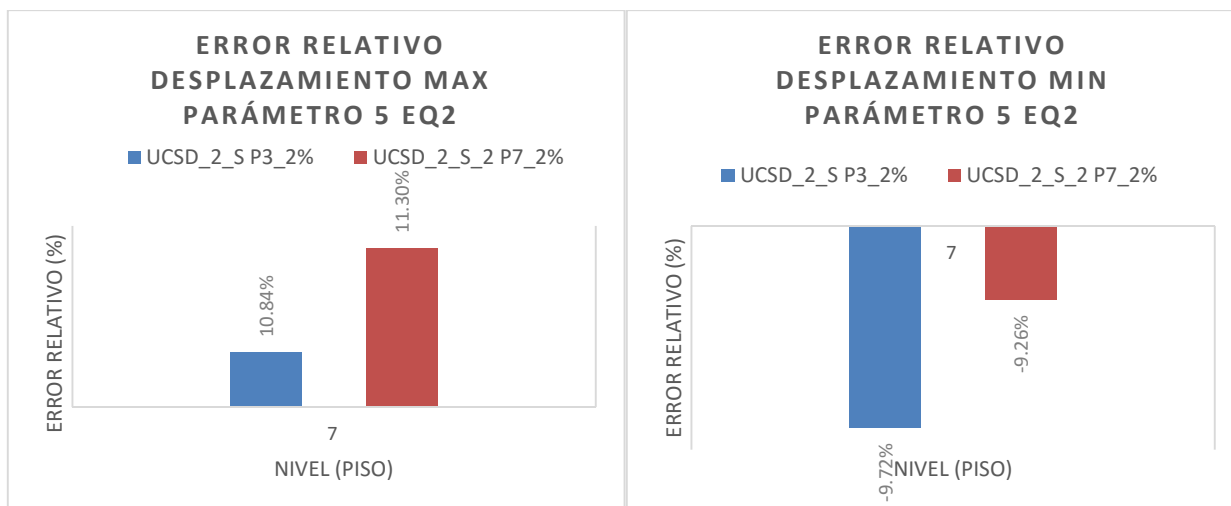


Ilustración 42. Error relativo desplazamientos parámetro 5 EQ2

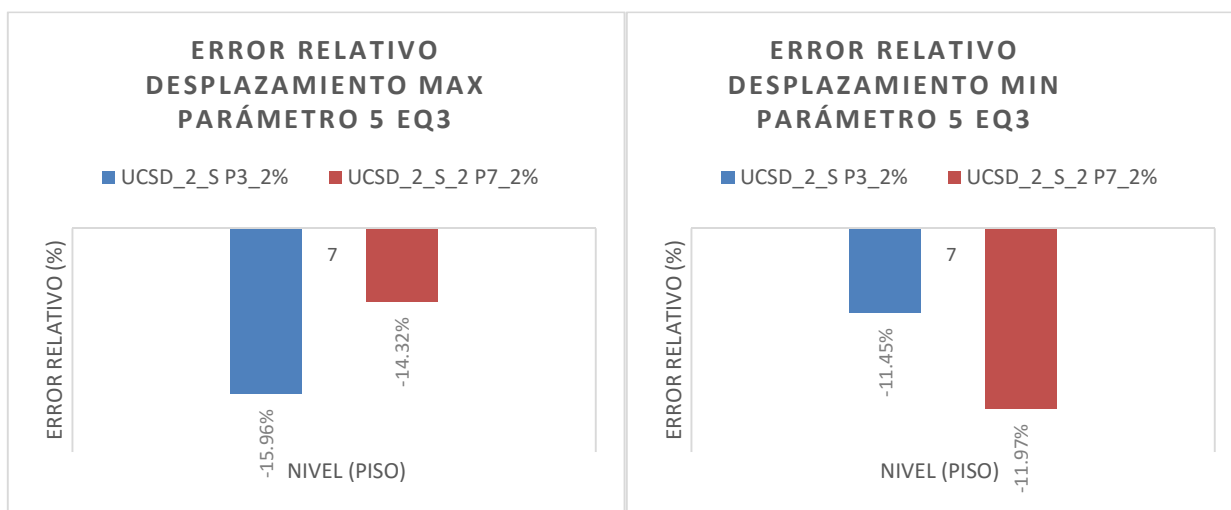


Ilustración 43. Error relativo desplazamientos parámetro 5 EQ3

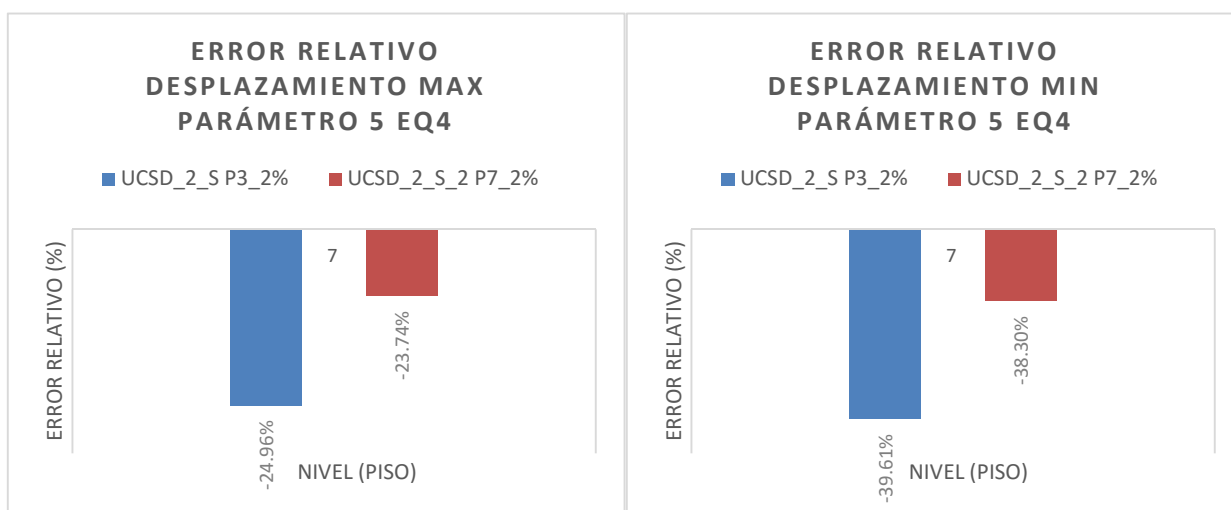


Ilustración 44. Error relativo desplazamientos parámetro 5 EQ4

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Un análisis similar puede realizarse para la respuesta en las derivas, donde se observa también poca significancia en la variación del parámetro 5. En la Ilustración 47 se observa como para el sismo de mayor intensidad EQ4 ambos modelos subestiman la deriva real, a diferencia de los que pasa para los sismos EQ2 y EQ3 donde las predicciones de los modelos sobreestiman la respuesta real.

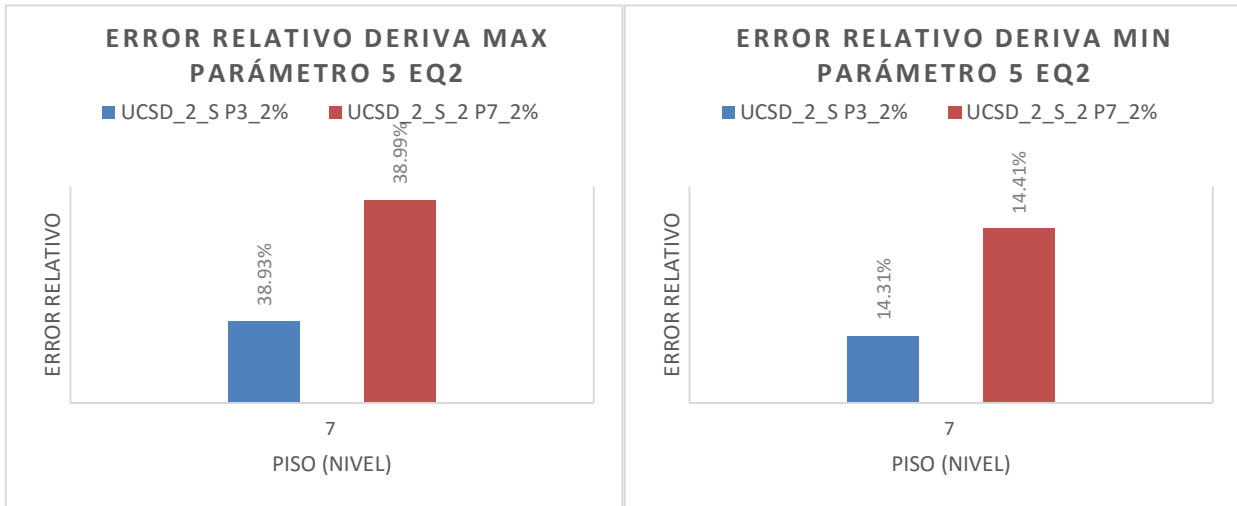


Ilustración 45. Error relativo derivas parámetro 5 EQ2

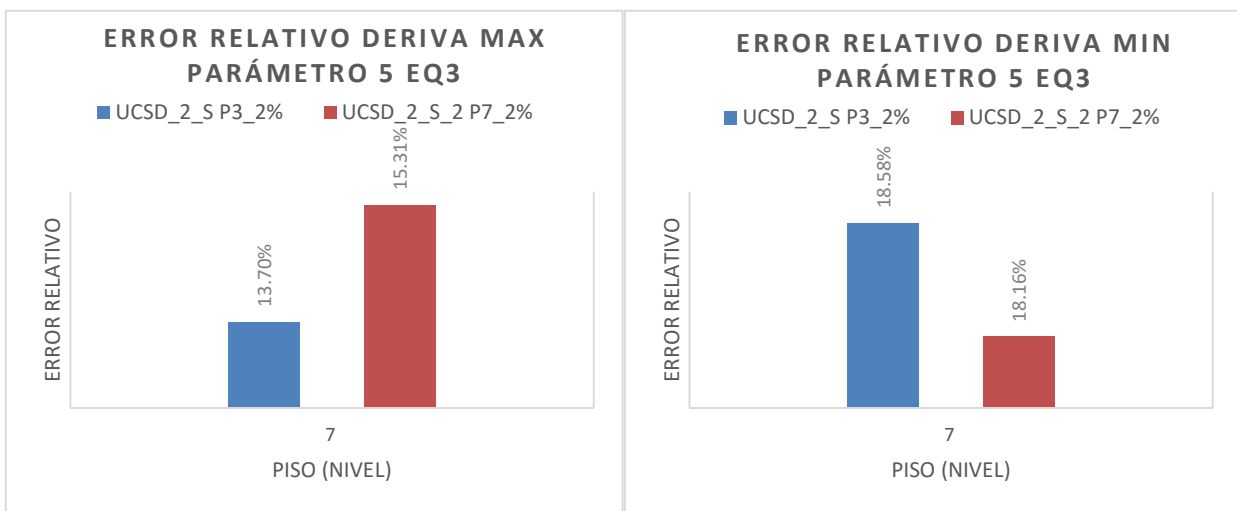


Ilustración 46. Error relativo derivas parámetro 5 EQ3

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

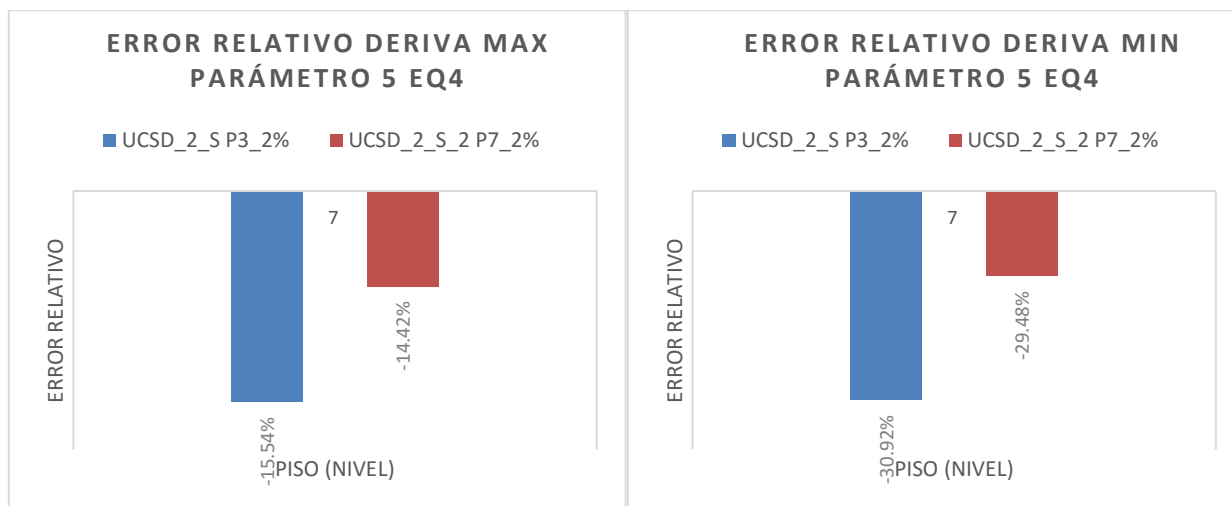


Ilustración 47. Error relativo derivas parámetro 5 EQ4

3.2.6 PARÁMETRO 6: MATERIAL DE CORTANTE

3.2.6.1 DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 6 (ETAPA 2)

Para definir por completo un componente de muro estructural dentro del software, es necesario definir un material de cortante que represente el comportamiento del muro ante el mecanismo de corte. Para esto, el software permite generar materiales de corte con características lineales o no lineales. Si se define un material de corte con características lineales la relación esfuerzo deformación tendrá las características mostradas en la

Ilustración 48, donde la relación depende únicamente del módulo de cortante que se especifica.

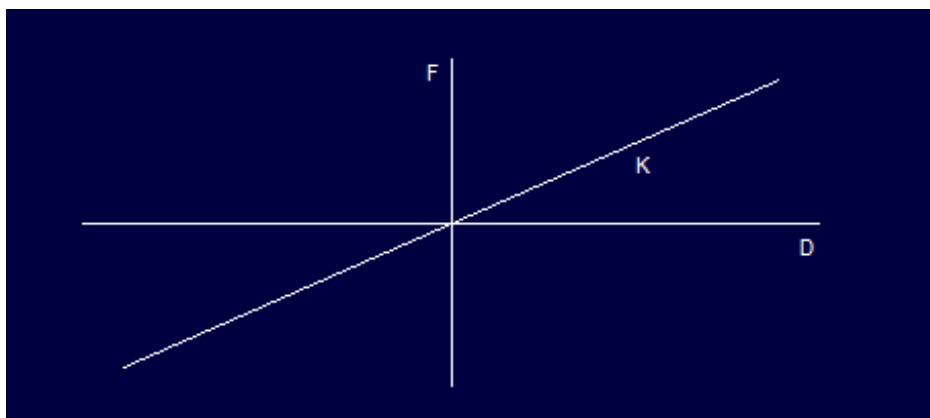


Ilustración 48. Relación esfuerzo deformación elástica material de cortante del muro

Si se define una relación no lineal el material tendrá una relación como la que se muestra en la Ilustración 49 donde se debe definir el módulo de elasticidad, la fuerza y la deformación máxima.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

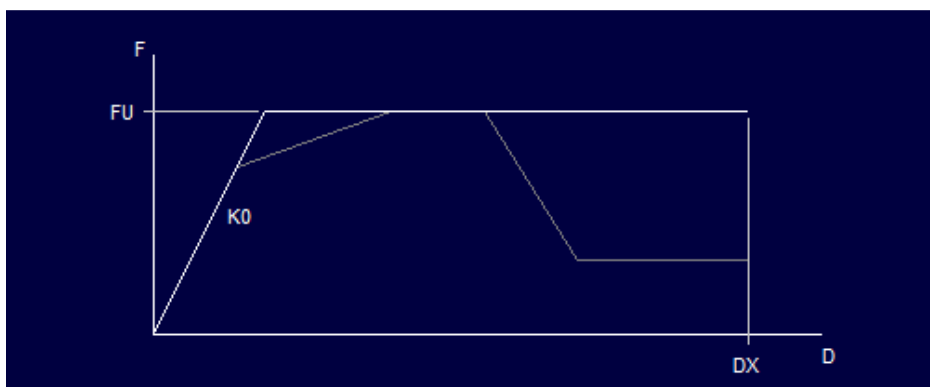


Ilustración 49. Relación esfuerzo deformación inelástica material de cortante del muro

3.2.6.2 MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 6 (ETAPA 3)

Para evaluar la influencia de este parámetro en la respuesta teórica se generaron tres materiales de cortante que varían en el valor asignado al módulo de cortante (G), con valores de $0.50G$, $0.75G$ y $1.00G$ y se definen dos modelos con las siguientes características:

UCSD_2_S: En este modelo se plantea un material de cortante con un valor de $0.50G$ para el muro del primer piso, representando un alto grado de fisuración y por lo tanto pérdida de capacidad por corte de la estructura en esa zona. Para los demás pisos se define un material con $0.75G$ representado una pérdida de capacidad menor, pero aún significativa.

UCSD_2_S_3: En este modelo se asigna un material de cortante a toda la estructura con valor de $1.00G$ con el fin de analizar la influencia al desprestigiar la pérdida de capacidad por cortante en el modelo debido a la fisuración.

3.2.6.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 6 (ETAPAS 4 Y 5)

De acuerdo a los resultados mostrados en las Ilustración 50 y 49, el error relativo de los modelos considerados es muy similar y presenta diferencias del orden de apenas un punto porcentual. Con estos resultados es posible considerar que existe poca significancia en la variación realizada para este parámetro sobre la respuesta de desplazamientos. Así mismo, como se observa en las Ilustración 52 y 51, se puede concluir que existe poca significancia de la variación del parámetro 6 en las respuestas de los modelos para las derivas, donde las diferencias en el error relativo están en un rango aproximado de cero a un punto porcentual.

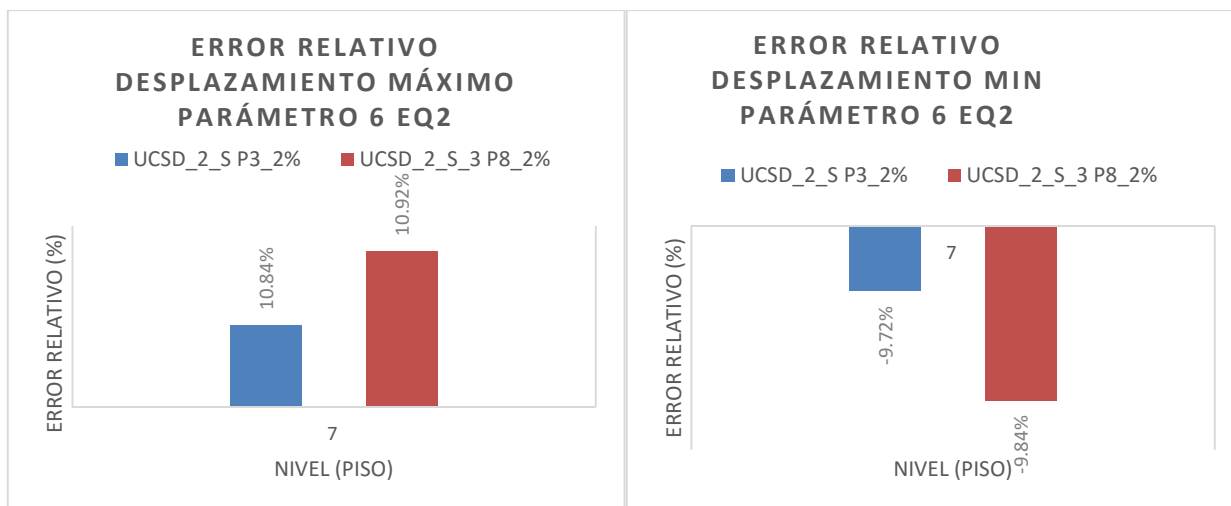


Ilustración 50. Error relativo desplazamientos parámetro 6 EQ2

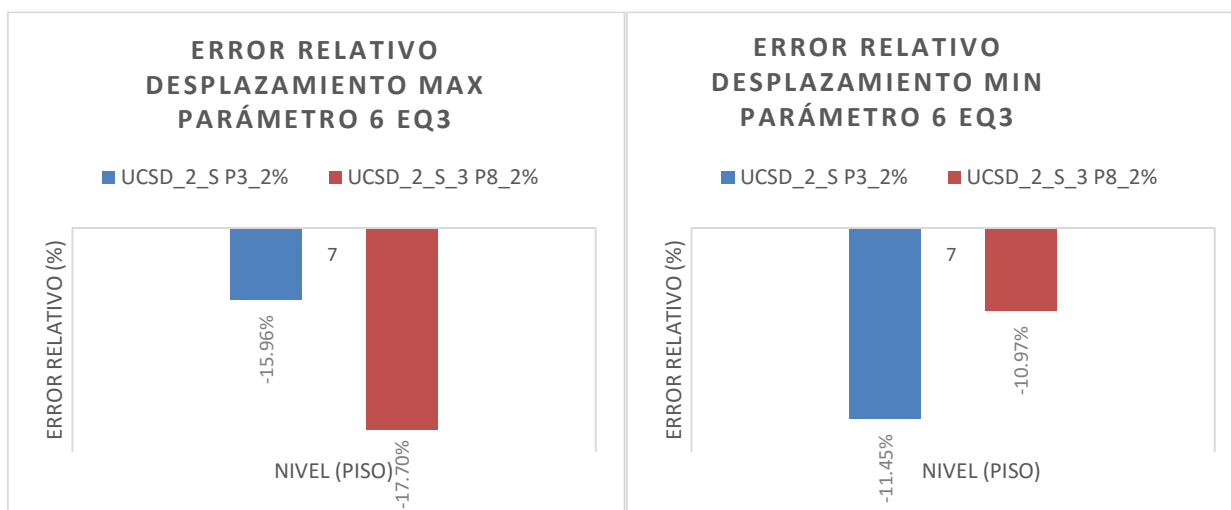


Ilustración 51. Error relativo desplazamientos parámetro 6 EQ3

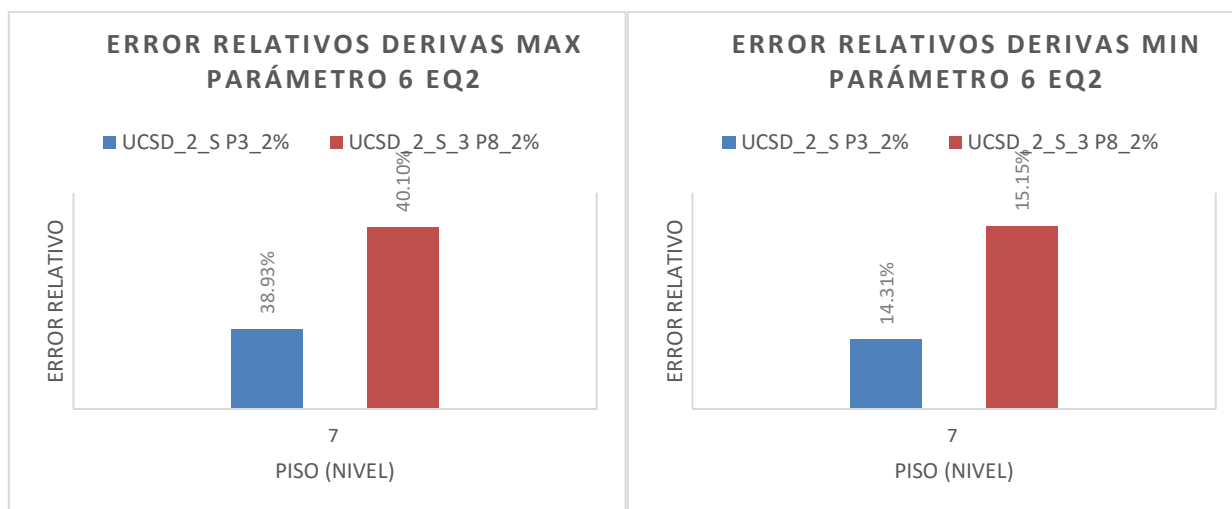


Ilustración 52. Error relativo derivas parámetro 5 EQ2

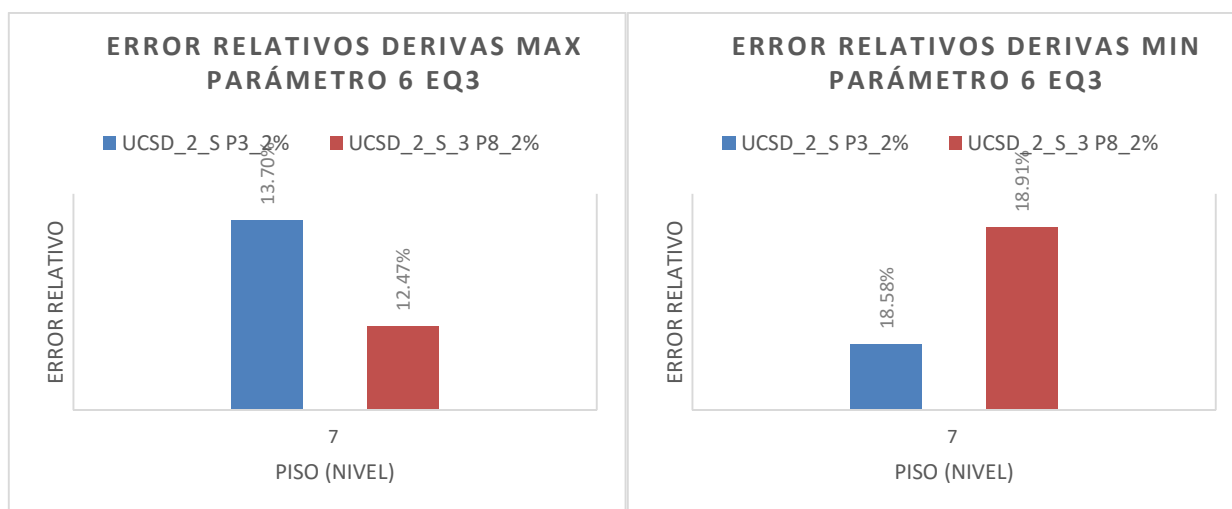


Ilustración 53. Error relativo derivas parámetro 6 EQ3

3.2.7 PARÁMETRO 7: RIGIDEZ DE LAS LOSAS

3.2.7.1 DESCRIPCIÓN PARÁMETRO 7 (ETAPA 2)

Comúnmente se asume en los modelos estructurales una rigidez constante sobre los elementos de losa, sin embargo es posible modelar la estructura considerando cierta pérdida de rigidez en estos elementos.

Se encuentra razonable analizar la influencia de este parámetro dentro de la investigación modificando la rigidez de los elementos de losa para representar en alguna medida la fisuración que se pueda generar como producto del movimiento sísmico.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.7.2 MODELOS GENERADOS PARA EVALUAR PARÁMETRO 7 (ETAPA 3)

Para analizar la influencia de este parámetro en la respuesta teórica se generan dos modelos, uno en el que se asigna a las losas el 100 % de su rigidez y otro en el que se asigna únicamente el 75 %. Los modelos se denominan respectivamente: UCSD_2_S y UCSD_2_S_1.

3.2.7.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETRO 7 (ETAPAS 4 Y 5)

Como se observa en las Ilustración 54 y 53, considerar la pérdida de rigidez en las losas para los sismos EQ2 y EQ3 conlleva a un aumento del error relativo en la respuesta de desplazamiento de alrededor de 10 puntos porcentuales, lo cual hace que dicha consideración sea inadecuada.

Al observar la Ilustración 56 sin embargo, se evidencia como la predicción de desplazamiento dada por el modelo donde se considera una menor rigidez en las losas, supera en gran medida la predicción del otro modelo. La diferencia de los errores relativos de desplazamiento para estos modelos en el sismo EQ4 se encuentra cercana a los 20 puntos porcentuales, lo que implica una gran mejoría en la respuesta del modelo.

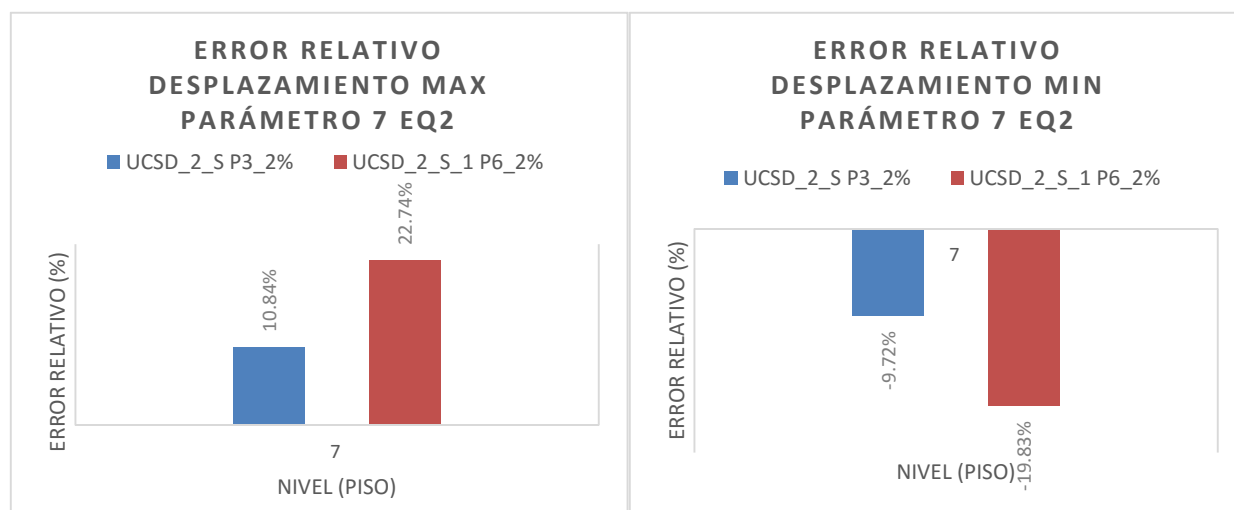


Ilustración 54. Error relativo desplazamientos parámetro 7 EQ2

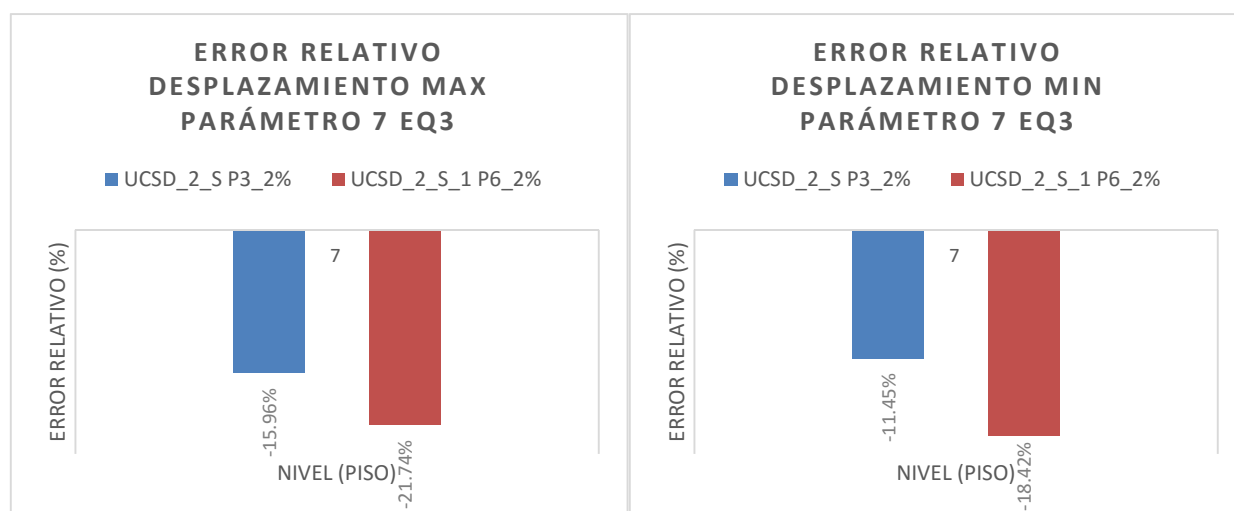


Ilustración 55. Error relativo desplazamientos parámetro 7 EQ3

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

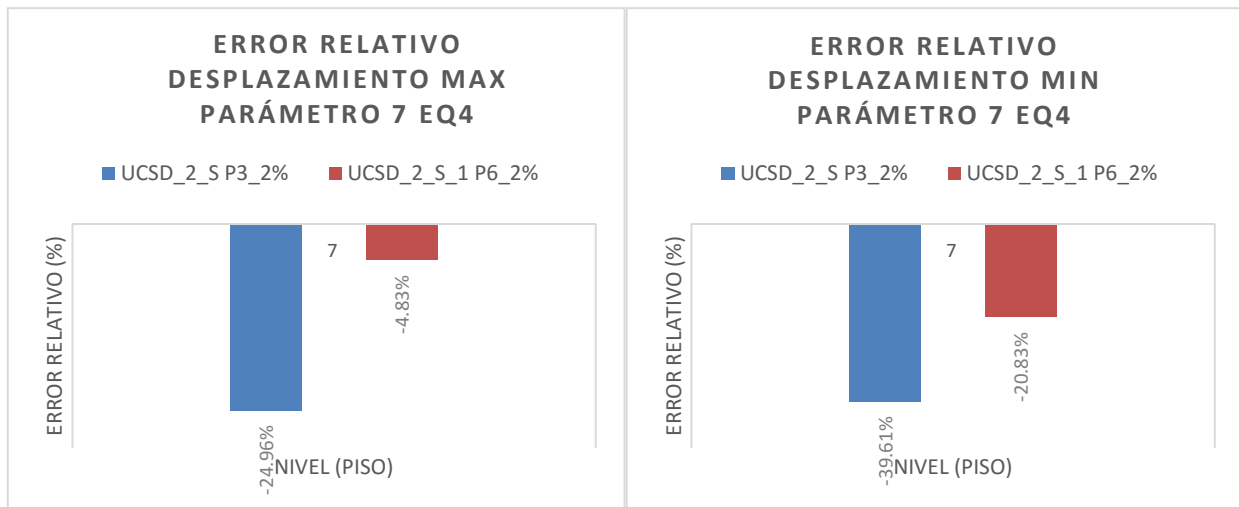


Ilustración 56. Error relativo desplazamientos parámetro 7 EQ4

Se observa como para las derivas, en los sismos EQ3 (Ilustración 58) y EQ4 (Ilustración 59), el modelo que considera el 75 % de la rigidez es muy superior en la predicción. Para el sismo EQ2 (Ilustración 57) sin embargo, no es posible encontrar una tendencia en la calidad de la respuesta pues difiere en la predicción de derivas máximas y mínimas.

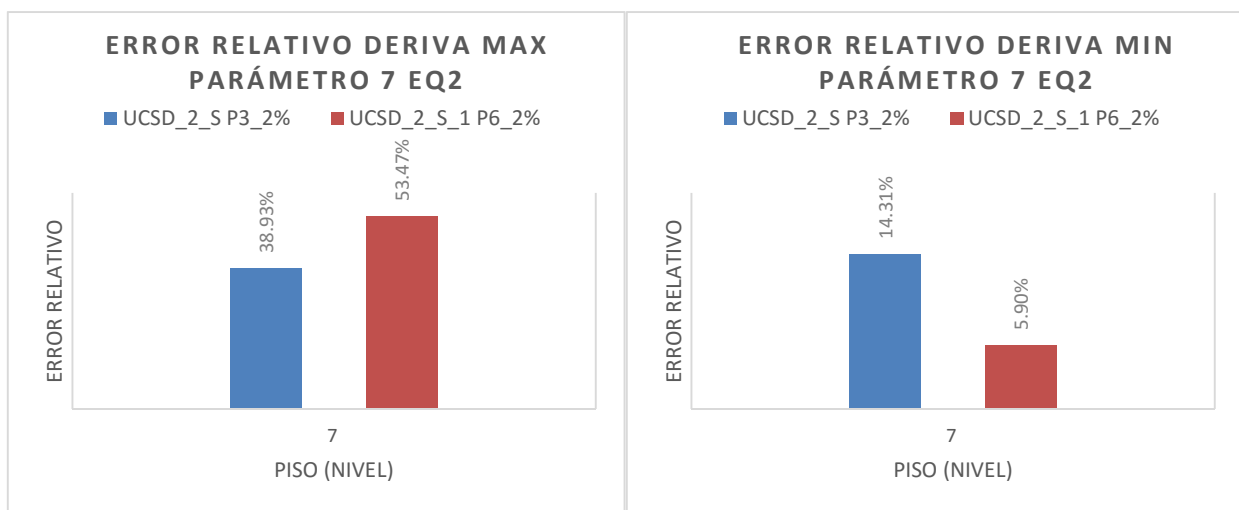


Ilustración 57. Error relativo derivas parámetro 7 EQ2

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

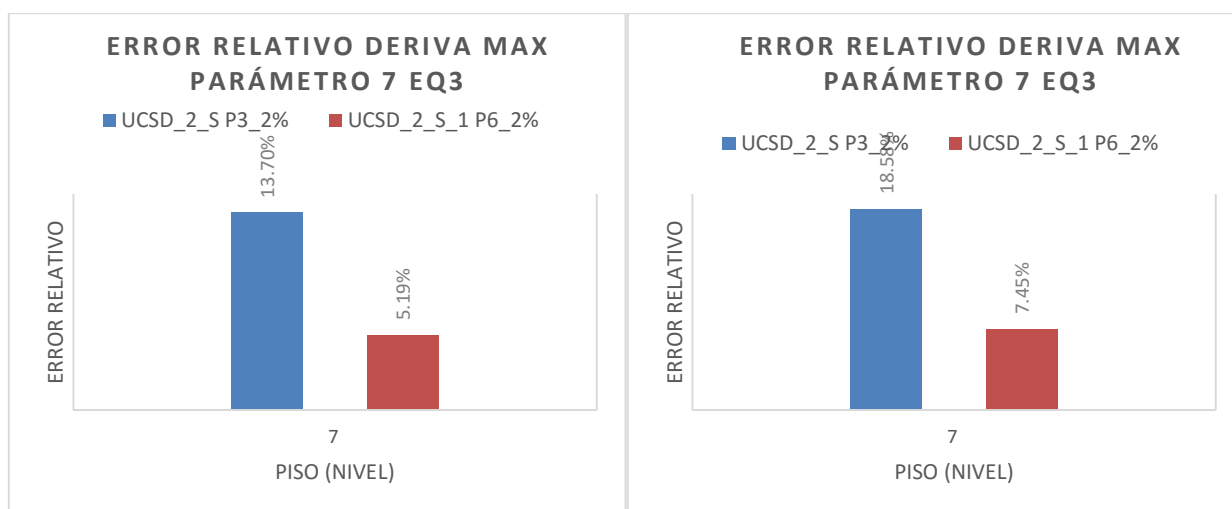


Ilustración 58. Error relativo derivas parámetro 7 EQ3

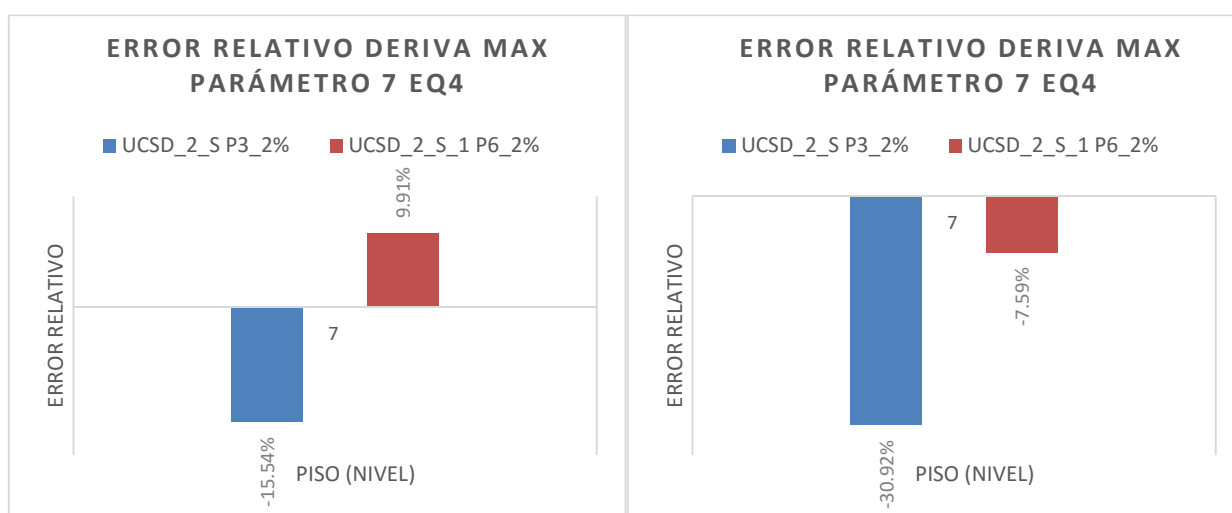


Ilustración 59. Error relativo derivas parámetro 7 EQ4

3.2.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD GENERAL (ETAPAS 4 Y 5)

En la Tabla 5 se resumen los resultados observados en la Ilustración 60, donde se aprecian los errores relativos de las predicciones de cada modelo para el sismo EQ2.

Se observa como el modelo de solo muro con 5 % de amortiguamiento, tiene resultados en el rango Muy buenos - Aceptables, mientras aquel donde se modelan las losas y se considera el mismo amortiguamiento, subestima los desplazamientos y tiene resultados dentro de la clasificación de Regulares. Así mismo, para el modelo de solo muro, las predicciones, al considerar un amortiguamiento del 2 % son clasificadas como Malas, sin embargo, cuando se modelan las losas, los resultados para un amortiguamiento del 2 % son clasificados como Aceptables.

Este resultado puede indicar la necesidad de aumentar el amortiguamiento del modelo cuando no se modele la losa como elemento de superficie y hacer lo contrario cuando se modela. Hay que

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

tener en cuenta que este análisis se está haciendo para el sismo EQ2, el cual tiene una intensidad relativamente baja, en comparación a los demás sismos analizados.

En general se evidencia un mejor comportamiento de los modelos con amortiguamiento de Rayleigh que de aquel donde se define el amortiguamiento Modal – Rayleigh combinado. Se observa también la influencia negativa de haber disminuido la rigidez de las losas.

Tabla 5. Predicción de desplazamientos de techo EQ2

Predicción de desplazamientos de techo EQ2			
Modelo	Error relativo		Clasificación
	Desplazamiento max	Desplazamiento min	
UCSD_1 P1_Sismo	35.19%	38.44%	Malo
UCSD_1_T1 P1_Sismo	34.71%	37.86%	Malo
UCSD_1_T1 P2_Sismo	1.47%	13.86%	Muy bueno - Aceptable
UCSD_2_S P1_0%	40.08%	0.10%	Inclasificable
UCSD_2_S P2_0%	40.08%	-0.37%	Inclasificable
UCSD_2_S P3_2%	10.84%	-9.72%	Aceptable
UCSD_2_S P3a_2%	10.50%	-9.79%	Aceptable
UCSD_2_S P4_5%	-25.00%	-33.23%	Regular
UCSD_2_S P5_Ray_Mod	0.92%	-15.17%	Muy bueno - Aceptable
UCSD_2_S_1 P6_2%	22.74%	-19.83%	Regular
UCSD_2_S_2 P7_2%	11.30%	-9.26%	Aceptable
UCSD_2_S_3 P8_2%	10.92%	-9.84%	Aceptable

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

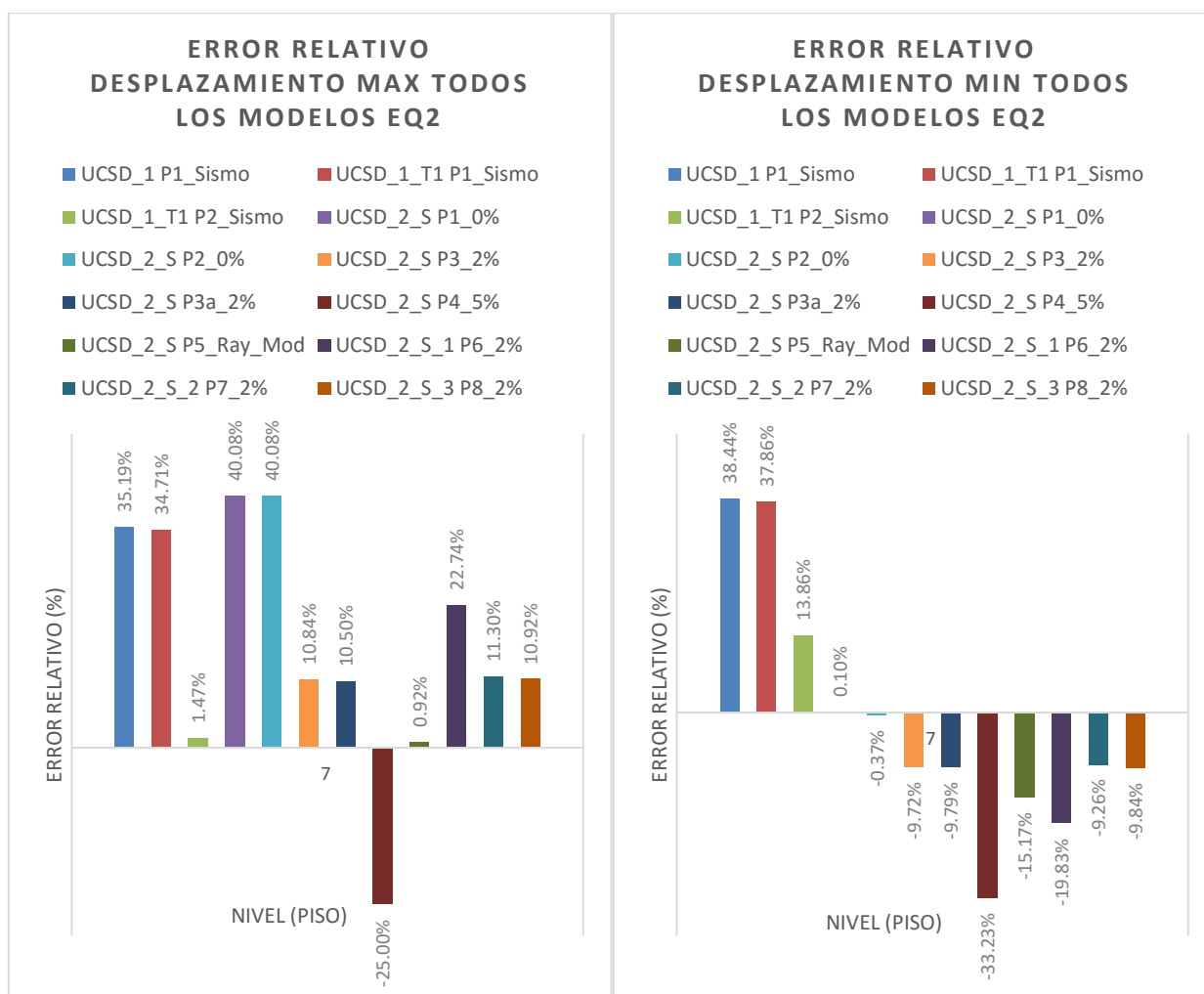


Ilustración 60. Error relativo desplazamientos todos los modelos EQ2

En la Tabla 6 se resumen los resultados observados en la Ilustración 61, donde se aprecian los errores relativos de las predicciones de cada modelo para el sismo EQ3.

Para este sismo se observan los mejores resultados de predicción de desplazamientos en el modelo de losas con un amortiguamiento del 0 %. El modelo de solo muros, sin embargo, vuelve a obtener buenas predicciones cuando se le asigna un valor de amortiguamiento de 5 %.

Los modelos de losas que consideran un 2 % de amortiguamiento de Rayleigh tienen en general predicciones aceptables.

Tabla 6. Predicción de desplazamientos de techo EQ3

Predicción de desplazamientos de techo EQ3		
Modelo	Error relativo	Clasificación

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Predicción de desplazamientos de techo EQ3			
	Desplazamiento max	Desplazamiento min	
UCSD_1 P1_Sismo	10.80%	50.73%	Inclasificable
UCSD_1_T1 P1_Sismo	9.31%	50.42%	Inclasificable
UCSD_1_T1 P2_Sismo	-17.34%	12.58%	Aceptable
UCSD_2_S P1_0%	-6.13%	4.81%	Muy bueno - Aceptable
UCSD_2_S P2_0%	-4.44%	6.08%	Muy bueno - Aceptable
UCSD_2_S P3_2%	-15.96%	-11.45%	Aceptable
UCSD_2_S P3a_2%	-15.99%	-11.45%	Aceptable
UCSD_2_S P4_5%	-42.57%	-22.89%	Malo
UCSD_2_S P5_Ray_Mod	-22.86%	-13.02%	Aceptable - Regular
UCSD_2_S_1 P6_2%	-21.74%	-18.42%	Aceptable - Regular
UCSD_2_S_2 P7_2%	-14.32%	-11.97%	Aceptable
UCSD_2_S_3 P8_2%	-17.70%	-10.97%	Aceptable

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

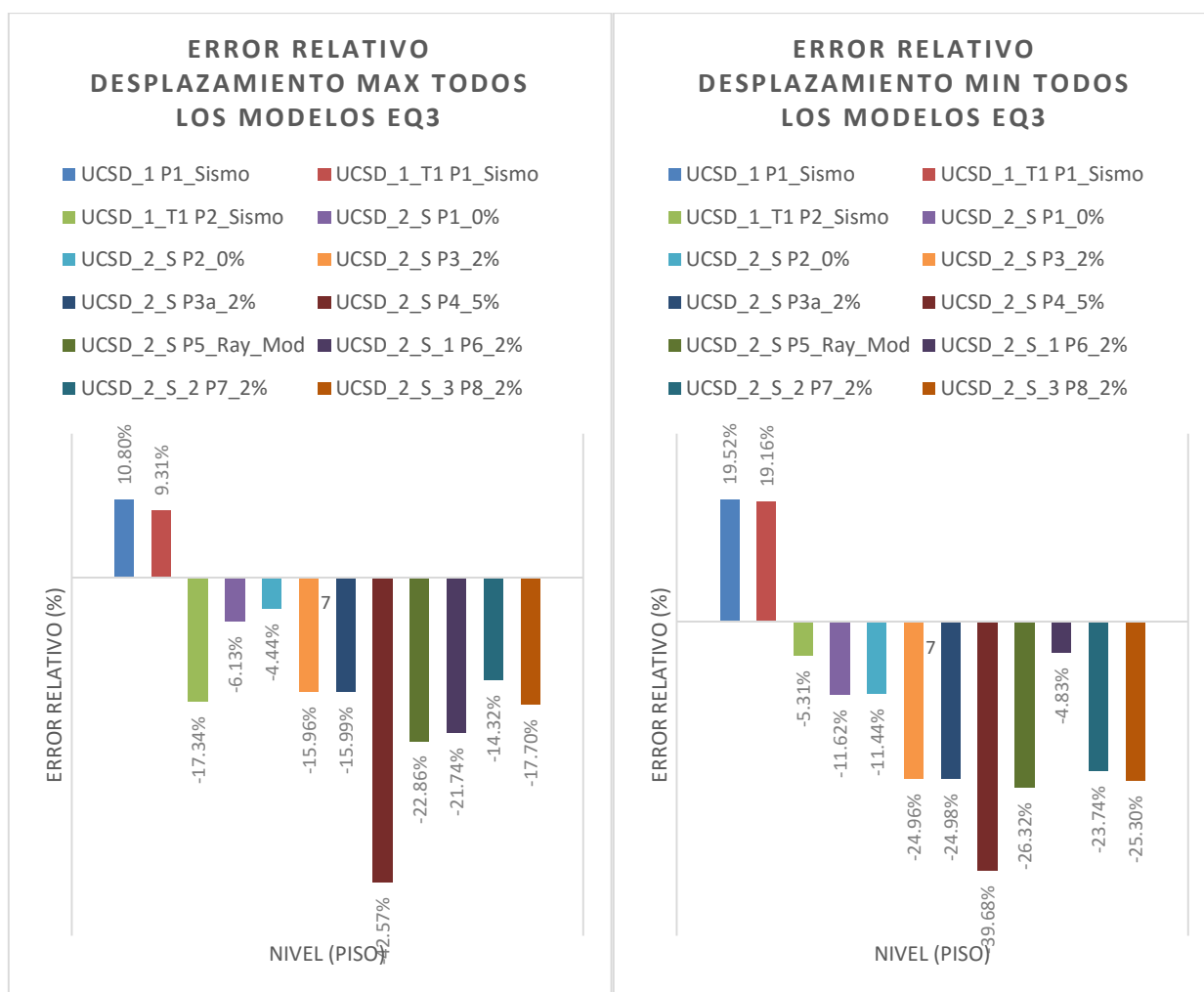


Ilustración 61. Error relativo desplazamientos todos los modelos EQ3

En la Tabla 7 se resumen los resultados observados en la Ilustración 62, donde se aprecian los errores relativos de las predicciones de cada modelo para el sismo EQ3.

Para el sismo de mayor intensidad EQ4, se encuentra que la mayoría de modelos analizados no predicen de manera correcta el desplazamiento real de la estructura, ya que tienden a subestimarlo. El único modelo que se encuentra en el rango Aceptable de predicción es el que considera un amortiguamiento de 0 % y modela las losas como elementos tipo shell. Al analizar la influencia del efecto p-delta para este modelo, se encuentra que tener en cuenta dicho efecto mejora la predicción en un poco menos de medio punto porcentual.

Tabla 7. Predicción de desplazamientos de techo EQ4

Predicción de desplazamientos de techo EQ4			
Modelo	Error relativo		Clasificación
	Desplazamiento max	Desplazamiento min	

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Predicción de desplazamientos de techo EQ4			
Modelo	Error relativo		Clasificación
	Desplazamiento max	Desplazamiento min	
UCSD_1 P1_Sismo	19.52%	-24.90%	Regular
UCSD_1 T1 P1_Sismo	19.16%	-25.00%	Regular
UCSD_1 T1 P2_Sismo	-5.31%	-33.11%	Inclasificable
UCSD_2 S P1_0%	-11.62%	-16.08%	Aceptable
UCSD_2 S P2_0%	-11.44%	-15.86%	Aceptable
UCSD_2 S P3_2%	-24.96%	-39.61%	Malo
UCSD_2 S P3a_2%	-24.98%	-39.61%	Malo
UCSD_2 S P4_5%	-39.68%	-54.37%	Malo
UCSD_2 S P5_Ray_Mod	-26.32%	-42.21%	Regular - Malo
UCSD_2 S_1 P6_2%	-4.83%	-20.83%	Aceptable - Regular
UCSD_2 S_2 P7_2%	-23.74%	-38.30%	Malo
UCSD_2 S_3 P8_2%	-25.30%	-40.12%	Malo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

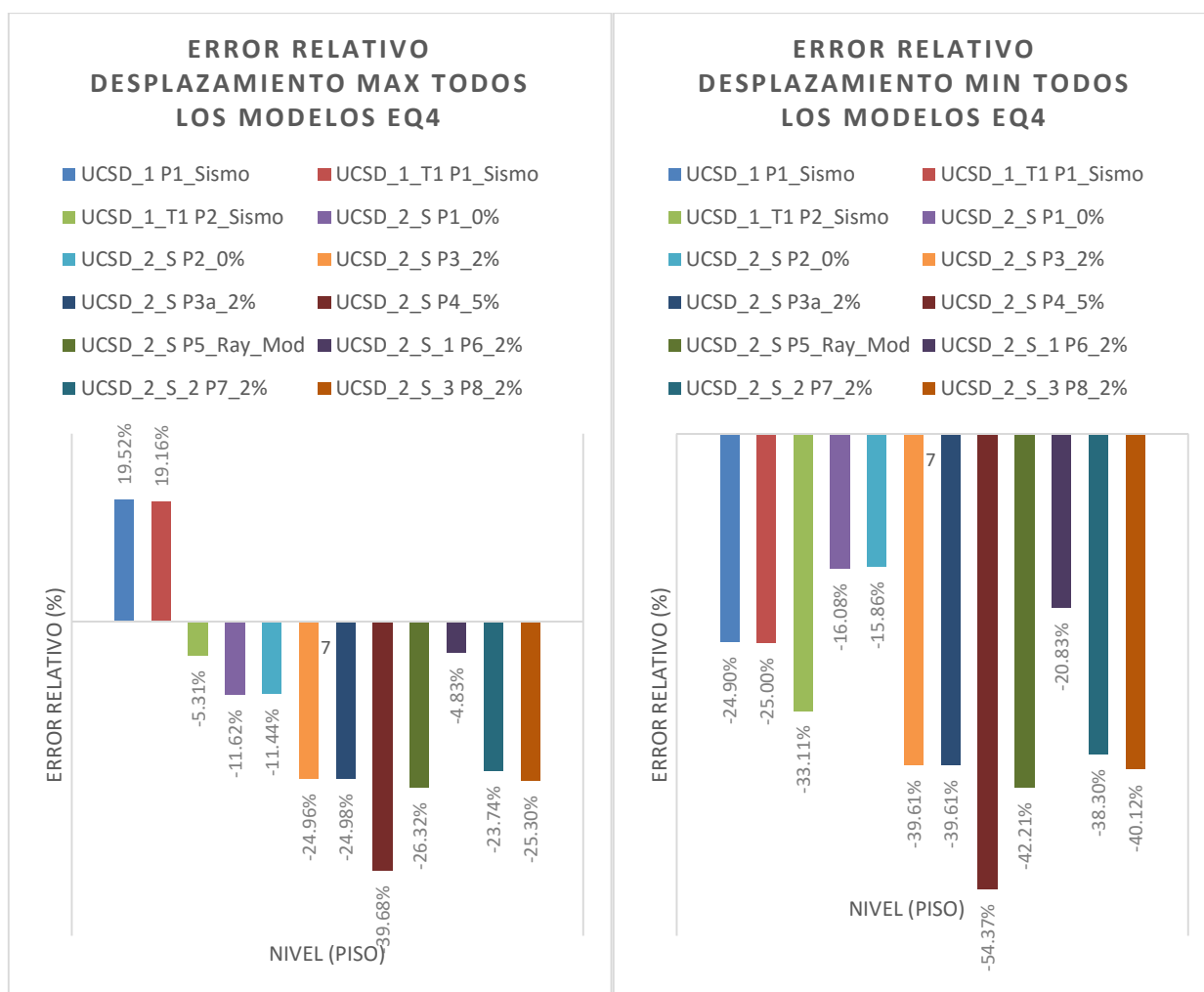


Ilustración 62. Error relativo desplazamientos todos los modelos EQ4

Al analizar las aceleraciones en la estructura, se encuentra que la mayoría de modelos de losas tienen predicciones erradas mostrando valores muy por encima de los esperados. Se encuentra sin embargo, que al no incluir el efecto p-delta en estos modelos, el error relativo se encuentra dentro de los rangos esperados.

Como se observa en la Ilustración 63, para el sismo EQ2, los modelos que mejor predicen las aceleraciones son los de solo muro, que consideran un amortiguamiento del 2 % de Rayleigh. Sin embargo, en esa misma ilustración se observa como estos pueden subestimar en gran medida el valor de las aceleraciones. Por otro lado, se observa que el error relativo del modelo de losas es alto y positivo, lo cual representa una sobreestimación de las aceleraciones del techo.

Las predicciones de aceleraciones para el sismo EQ3, como se observa en la Ilustración 64, son aceptables para los modelos de solo muro, a pesar de esto, se observa que para aceleraciones positivas, estos modelos sobreestiman la respuesta, mientras para las negativas las subestiman. Resulta difícil concluir sobre las predicciones del modelo de losas pues arroja resultados contradictorios para aceleraciones negativas y positivas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

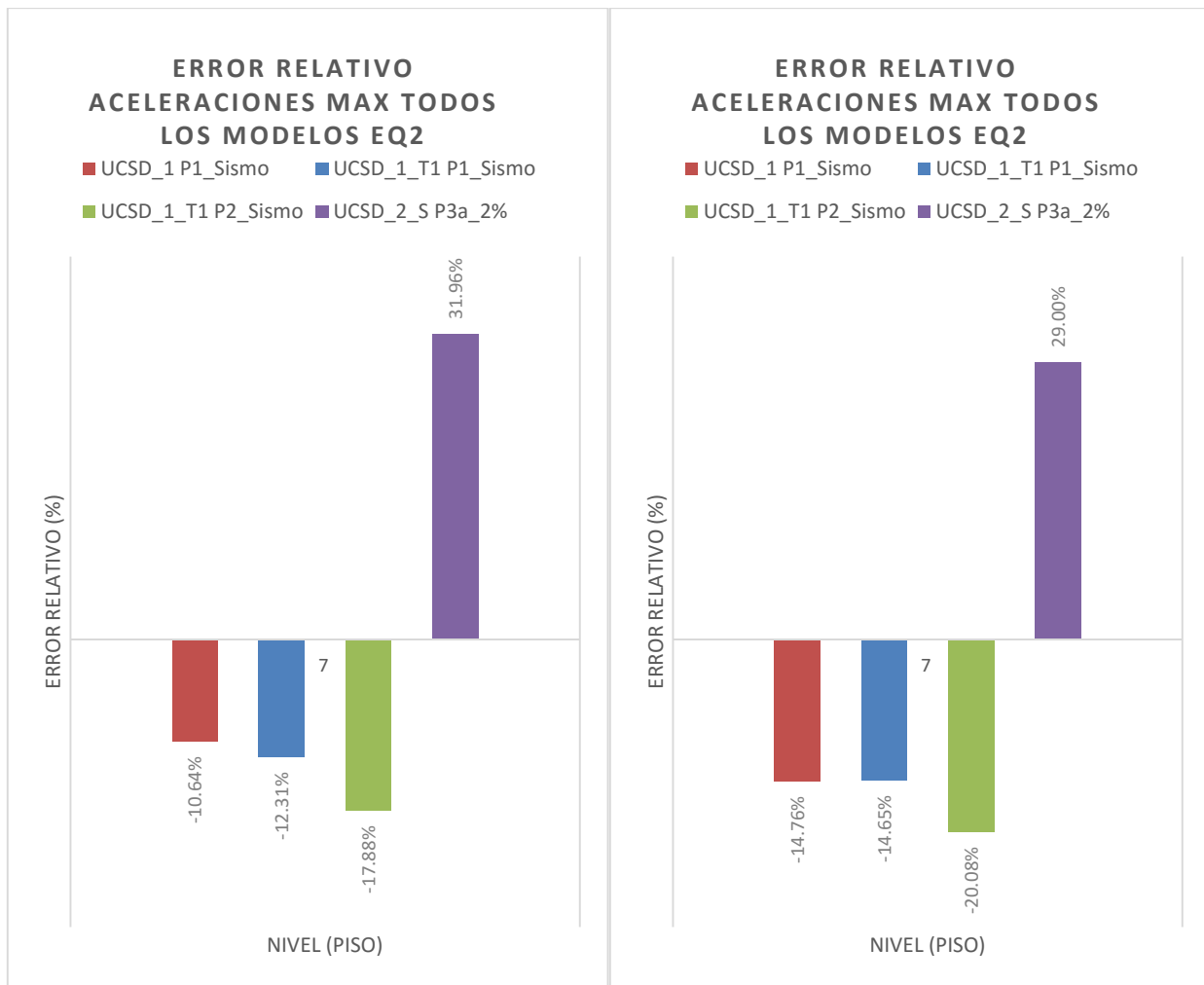


Ilustración 63. Error relativo aceleraciones EQ2

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 64. Error relativo aceleraciones EQ3

Para el parámetro de salida de derivas se encuentra que, para el sismo EQ2 todos los modelos de solo muros presentan malas predicciones, independientemente del valor de amortiguamiento. Se puede observar en la Tabla 8 y en la Ilustración 65 que el modelo que mejor predice las derivas es aquel donde se modelan las losas y considera un amortiguamiento de Rayleigh de 5 %.

Se observa como los modelos que más sobreestiman las derivas son los de solo muro, especialmente cuando el amortiguamiento tiene valores pequeños.

Para muchos modelos no es posible clasificar la calidad de la respuesta, pues no presenta una tendencia en la predicción de las derivas positivas y negativas.

Tabla 8. Predicción de derivas EQ2

Predicción de derivas EQ2			
Modelo	Error relativo		Clasificación
	Desplazamiento max	Desplazamiento min	
UCSD_1 P1_Sismo	84.67%	77.58%	Malo
UCSD_1_T1 P1_Sismo	84.00%	76.82%	Malo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Predicción de derivas EQ2			
Modelo	Error relativo		Clasificación
	Desplazamiento max	Desplazamiento min	
UCSD_1_T1 P2_Sismo	47.32%	51.62%	Malo
UCSD_2_S P1_0%	66.24%	29.07%	Regular - Malo
UCSD_2_S P2_0%	65.92%	28.47%	Regular - Malo
UCSD_2_S P3_2%	38.93%	14.31%	inclasificable
UCSD_2_S P3a_2%	38.61%	14.10%	inclasificable
UCSD_2_S P4_5%	0.35%	-10.92%	Muy bueno - Bueno
UCSD_2_S P5_Ray_Mod	30.33%	6.91%	Aceptable - Regular
UCSD_2_S_1 P6_2%	53.47%	5.90%	Inclasificable
UCSD_2_S_2 P7_2%	38.99%	14.41%	Inclasificable
UCSD_2_S_3 P8_2%	40.10%	15.15%	inclasificable

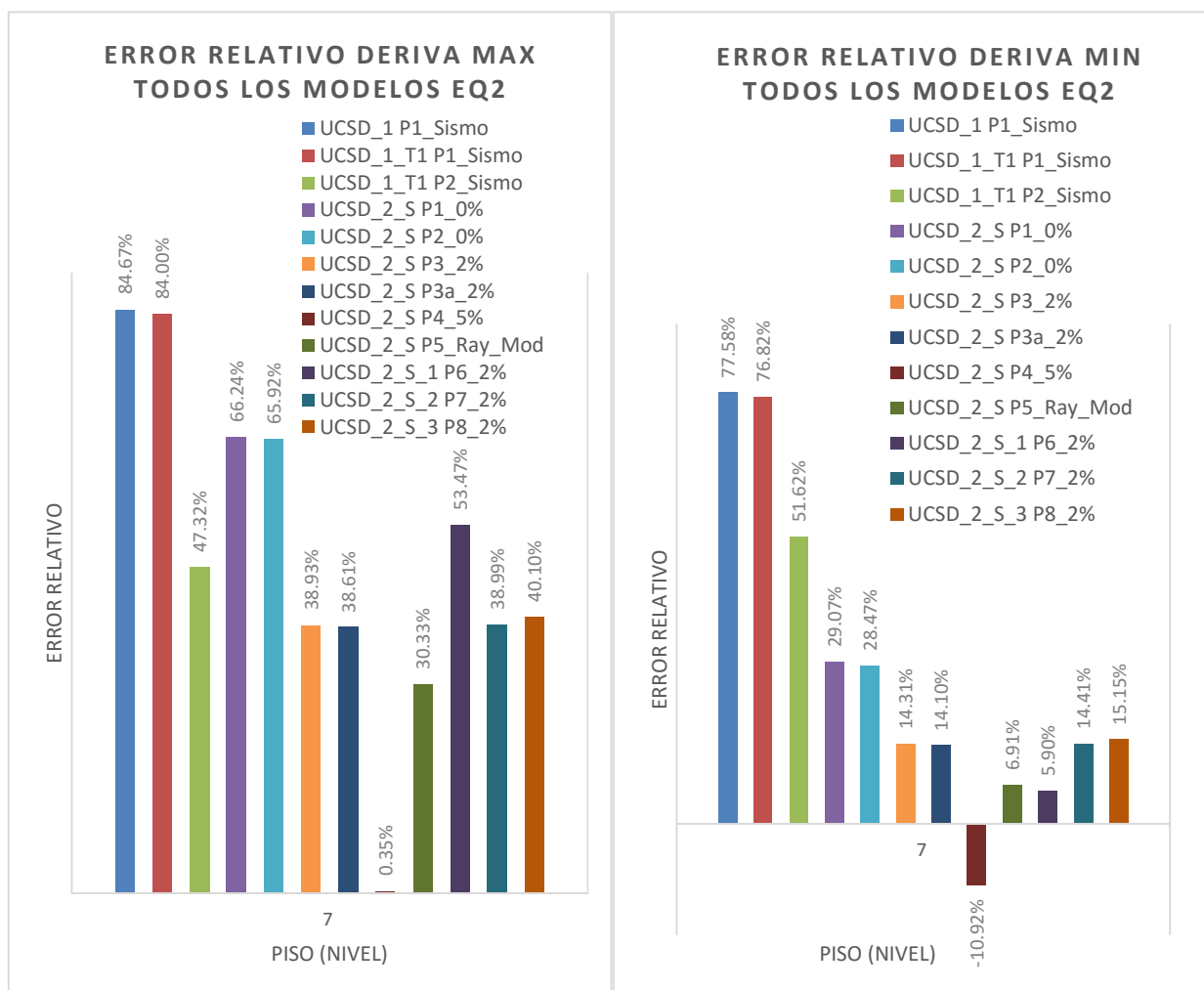


Ilustración 65. Error relativo derivas todos los modelos EQ2

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Como se observa en la Tabla 5 y en la Ilustración 66 la predicción de derivas falla de nuevo, en este caso para el sismo EQ3, cuando el modelo es de solo muro.

La mayor parte de modelos de losas, predicen las derivas de manera aceptable, sin embargo, es importante resaltar la buena respuesta obtenida en el modelo donde se considera la pérdida de rigidez en los elementos de losa a un 75 % de su valor original.

Tabla 9. Predicción de derivas EQ3

Predicción de desplazamientos de techo EQ3			
Modelo	Error relativo		Clasificación
	Desplazamiento max	Desplazamiento min	
UCSD_1 P1_Sismo	45.74%	95.28%	Malo
UCSD_1_T1 P1_Sismo	43.86%	94.73%	Malo
UCSD_1_T1 P2_Sismo	16.80%	46.52%	Malo
UCSD_2_S P1_0%	22.99%	32.85%	Regular
UCSD_2_S P2_0%	23.27%	34.86%	Regular
UCSD_2_S P3_2%	13.70%	18.58%	Aceptable
UCSD_2_S P3a_2%	13.67%	18.58%	Aceptable
UCSD_2_S P4_5%	-19.16%	5.91%	Aceptable
UCSD_2_S P5_Ray_Mod	6.36%	17.36%	Aceptable
UCSD_2_S_1 P6_2%	5.19%	7.45%	Aceptable
UCSD_2_S_2 P7_2%	15.31%	18.16%	Aceptable
UCSD_2_S_3 P8_2%	12.47%	18.91%	Aceptable

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 66. Error relativo derivas todos los modelos EQ3

4 DISCUSIÓN DE RESULTAODS

Después de observar las predicciones de los modelos para la estructura de muros de concreto reforzado de 7 pisos, se encuentran una gran variedad de resultados para la discusión. De acuerdo con el análisis de sensibilidad para la respuesta de desplazamientos, derivas y aceleraciones, se pueden realizar los siguientes comentarios:

Uno de los parámetros para los que los modelos presentan mayor sensibilidad en la respuesta, y que por lo tanto vale la pena considerar detenidamente, es el efecto de la modelación de los elementos de losas. Se observa cómo para la mayor parte de los sismos analizados, los modelos de solo muro (donde no se modelan las losas) sobreestiman las respuestas, mientras en los que se modelan las losas de piso, obtienen generalmente predicción aceptables.

Se observa además una relación entre este parámetro y el amortiguamiento, ya que se identifica la necesidad de aumentar el valor del amortiguamiento en los modelos de solo muro para mejorar la predicción en la respuesta y disminuir la sobreestimación en los valores de salida.

Se reconoce también la importancia del parámetro de rigidez de las losas en la predicción de las derivas para sismos de intensidad alta como como el EQ3 y el EQ4. Se identifica que al disminuir la rigidez de las losas a un 75 %, con el fin de modelar cierto grado de fisuración en los

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

elementos, la predicción de las derivas mejora significativamente, incluso dentro de la investigación, este modelo presenta las mejores predicciones entre los analizados.

Se observa que no vale la pena invertir demasiado esfuerzo para llegar a un detallamiento muy complejo de las fibras de las secciones transversales, ya que con una discretización más gruesa, los resultados son generalmente adecuados. Así mismo, para el modelo del concreto, se encuentra que el material bilineal es suficiente para realizar predicciones aceptables de la respuesta, por lo que tampoco se deberían enfocar los esfuerzos en detallar al máximo este parámetro. Vale aclarar que si el objetivo es llegar a un nivel muy preciso de predicción en la respuesta, se puede considerar entonces invertir el esfuerzo en ajustar estos parámetros, sin embargo, los resultados muestran que las predicciones se mejoran en tan solo un punto porcentual por parámetro aproximadamente, cuando se incluye gran nivel de detalle.

El efecto p-delta no resulta ser determinante en la respuesta, incluso para sismos de intensidad alta como el EQ4, en el que cabría esperar una alta influencia de la no linealidad geométrica, no se identifica una diferencia considerable al despreciar este parámetro en el análisis.

5 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Se considera importante continuar la investigación analizando otros parámetros de salida como fuerzas cortantes y momentos en la estructura, ya que como se observa, los resultados y la sensibilidad de los modelos ante la variación de parámetros de entrada no es la misma en todas las respuestas, así, por ejemplo, un modelo que responde bien para las deformaciones no necesariamente lo hace bien para aceleraciones, por lo que resulta interesante analizar los demás parámetros de salida con el fin de llegar a conclusiones más generales.

Se considera importante también, investigar con mayor profundidad la causa de los errores en la respuesta de aceleraciones para los modelos de losas. A pesar de identificar el efecto p-delta como una posible fuente de error no se alcanza a realizar un análisis a fondo sobre este fenómeno.

BIBLIOGRAFÍA

- Abell, M. (2013). P-Delta effect. Retrieved from <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/P-Delta+effect>
- Barberis-Maino, L. (1989). NEHRP Recommended Provisions: Design Examples. *Molecular and General*. Retrieved from <http://www.springerlink.com/index/X7910347206PVURQ.pdf>
- Bathe, K. (1996). *Computers & Structures*. (Massachusetts Institute of Technology, Ed.). Massachusetts.
- Blandón, C. (2011). *Sensibilidad de análisis no lineal cronológico de elementos de concreto reforzado: Caso de predicción de respuesta dinámica para ensayos en mesa vibradora*.
- Computers and Structures. (2006). Perform-3D Manual, (August).
- Fragiadakis, M., & Papadrakakis, M. (2008). Modeling, analysis and reliability of seismically excited structures: Computational issues. *International Journal of Computational Methods*, 03.
- García, L. (1998). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*. (Universidad de los Andes, Ed.) (1a ed.). Bogotá.
- Hajjar, J. F., Schiller, P. H., & Molodan, A. (1998). A distributed plasticity model for concrete-filled steel tube beam-columns with interlayer slip. *Engineering Structures*, 20(8), 663–676. [http://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00107-7](http://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00107-7)
- Kelly, T. (2006). A blind prediction test of nonlinear analysis procedures for reinforced concrete shear walls, 1–18.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain model for confined concrete.
- Norma sismo resistente del 2010 Diario oficial*. (2010). Colombia.
- OrcaFlex. (n.d.). Rayleigh Damping: Guidance. Retrieved from <http://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/Documentation/Help/Content/html/RayleighDamping,Guidance.htm>
- Papachristidis, A., Fragiadakis, M., & Papadrakakis, M. (n.d.). Inelastic analysis of frames under combined bending , shear and torsion, 1–27.
- Picón, R. (2003). Modelo simplificado para el comportamiento dinámico de pórticos con vigas plana-columna de concreto armado considerando el deslizamiento entre el refuerzo y el concreto en las juntas.
- Rubinstein, M., & Ascheri, J. P. (2011). Análisis del amortiguamiento proporcional a la rigidez tangente en sistemas dinámicos no lineales, XXX, 1–4.

- Schotanus, M., & Maffei, J. (2008). APPROPRIATE STIFFNESS AND MODELING ASSUMPTIONS FOR HIGH-RISE CONCRETE WALL BUILDINGS, 18.
- SeismoStruct. (2012). User Manual.
- Shunsuke Otani. (1981). Hysteresis models of reinforced concrete for earthquake response analysis.
- Zhao, J., & Sritharan, S. (2006). Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures. *ACI Spring Convention*.